

Automatisering av konstruktionsberäkningar för konceptuell design

Emelie Mattsson & Henning Stenbäck

Avdelningen för Konstruktionsteknik
Lunds Tekniska Högskola
Lunds Universitet, 2019
Rapport TVBK-5269

Avdelningen för Konstruktionsteknik
Lunds Tekniska Högskola
Box 118
221 00 LUND

Division of Structural Engineering
Faculty of Engineering, LTH
P.O. Box 118
S-221 00 LUND
Sweden

Automation of design calculations for conceptual design

Automatisering av konstruktionsberäkningar för konceptuell design

Emelie Mattsson & Henning Stenbäck
2019

Rapport TVBK-5269

ISSN 0349-4969

ISRN: LUTVDG/TVBK-19/5269 (98)

Examensarbete

Handledare: Ivar Björnsson (LTH), Martin Fröderberg (Tyréns AB)

Maj 2019

Förord

Detta examensarbete är slutet på våra studier på civilingenjörsprogrammet Väg- och Vatten vid Lunds Tekniska Högskola. Arbetet har varit ett samarbetet mellan LTH's konstruktionsavdelning och avdelningen för Tidiga skeden på Tyréns AB i Lund där också huvuddelen av allt arbete har genomförts.

Vi vill rikta ett stort tack till vår handledare på Tyréns Martin Fröderberg, för vägledning och tålamod genom hela arbete och för möjligheten att få sitta hos er under hela arbetet. Vi vill också rikta ett tack till Ivar Björnsson för din värdefulla feedback under terminens gång. Slutligen vill vi tacka hela Tyréns konstruktionsavdelning i Lund som tagit emot oss med öppna armar och fått oss att känna oss som en naturlig del av gänget.

Lund, Mars 2019

Emelie Mattsson & Henning Stenbäck

Sammanfattning

Syftet med detta arbete är att undersöka möjligheterna kring att automatisera konstruktionsberäkningar i ett tidigt skede. Automatiseringen sker med hjälp av det parametriska verktyget Grasshopper som är ett insticksprogram till Rhino. I skriptet kan skjuväggar optimeras stabilisera byggnaden med minsta möjliga materialmängd. Skriptet optimerar placering, antal och storlek på skjuväggarna i det stabiliserande systemet. För att kontrollera noggrannheten av resultatet kommer två fallstudier att göras. Resultatet från Grasshopper kommer att jämföras mot både FEM-beräkningar i Robot och resultatet från handberäkningar.

Abstract

The purpose of this master's thesis is to examine the possibilities of automating construction design calculations used in the conceptual design phase.

The automation will be created in the parametric toolkit Grasshopper 3D which is based on Rhinoceros 3D. The script will be able to analyse different shear walls position in plane and calculate the horizontal forces and moments which depends on the amount, position and sizes of the shear walls.

Validation of the script will be made by doing parallel hand calculations and using the finite element method. Both calculation methods will together with the script be applied to two different case studies.

Keywords: Conceptual design, parametric design, load bearing system,

Innehåll

Förord	I
Sammanfattning	II
Abstract	III
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte och Mål	2
1.3 Omfattning och avgränsning	2
1.4 Arbetsmetod	3
1.5 Rapportöversikt	3
2 Litteraturstudie	5
2.1 Konceptuell design	5
2.2 Parametrisk design	6
2.3 Kombinationen Konceptuell- och Parametrisk design	7
2.4 Beräkningsmetod	8
2.5 Stomstabilisering	9
2.5.1 Fackverk	9
2.5.2 Ramkverkan	10
2.5.3 Skivverkan	11

2.5.4	Stabiliserande kombinationer av system för högre byggnader	12
3	Metod	17
3.1	Beräkningsmodell	18
3.1.1	Grasshoppermodellering	20
3.1.2	Handberäkningar	22
3.1.3	FEM	24
4	Grasshopperskriptet	29
4.1	Skriptförklaring	29
4.2	Skriptbergränsningar	32
5	Fallstudie	33
5.1	Fallbeskrivning	33
5.2	Fallstudie Hus-ett	35
5.2.1	Grasshopper	36
5.2.2	Handberäkningar	38
5.2.3	FEM	42
5.3	Fallstudie Teliabyggnaden	46
5.3.1	Grasshopper	47
5.3.2	Handberäkningar	49
5.3.3	FEM	53
6	Resultat	57
6.1	Grasshopperskriptet	57
6.2	Fallstudie Hus-ett	57
6.3	Fallstudie Teliabyggnaden	59
7	Slutsats och diskussion	61
7.1	Slutsats	61
7.2	Diskussion	62

7.3 Fortsatta studier	63
8 Litteraturförteckning	65
A Dimensionerande laster	67
A.1 Karaktäristiska lastdata för båda byggnader	67
A.1.1 Vindlast	67
A.1.2 Snedställningslast	68
B Resultat Grasshopper	71
B.1 Grasshopper	71
B.1.1 Hus-ett	71
B.1.2 Telia	76
C Resultat handberäkningar	81
C.1 Handberäkningar	81
C.1.1 Hus-ett	81
C.1.2 Telia	89
D FEM-resultat från Robot	99
D.1 Hus-ett	99
D.1.1 Tvärkraft	99
D.1.2 Horisontalkraft	100
D.1.3 Moment	101
D.2 Telia	104
D.2.1 Tvärkraft	104
D.2.2 horisontalkraft	105
D.2.3 Moment	106

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Noggranheten hos beräkningarna i ett datorprogram är aldrig större än personen som programmerat det (Fröderberg, 2019).

Idag finns det många olika datorbaserade verktyg som kan effektivisera och förbättra arbetet för byggingenjörer. Verktygen kan utföra avancerade beräkningar, visualisera 3d-modeller och redovisa detaljanalyser på ett enkelt sätt. Att använda datorverktyg kan bidra till en effektivare och snabbare beräkningsprocess och ge utrymme för flera lösningsförslag att analyseras. Fler analyser ger konstruktörer bättre underlag för sina beslut vilket kan bidra till ett bättre utförande och slutresultat. Att vara kritisk vid användandet av datorprogram är av yttersta vikt eftersom felaktigt inmatad data eller felaktig användning kan generera resultat som ser rimliga ut men är felaktiga. (Borthwick et al., 2013).

Det finns flera fördelar med att ta hjälp av datorn för att göra analyser, men att använda dessa utan att ha någon förståelse kan ha stora konsekvenser. Det som är viktigt att veta vid datoranalyser är bland annat vilka typer av konstruktioner som programmet eller modulen i fråga är lämpad för, vilken indata som behövs samt detaljnivån på den valda modellen. Det krävs även en viss förkunskap för att kunna avgöra resultatets rimlighet och relevans. Utan denna kunskap ökar risken för en felbedömning vilket kan leda till att bygghandlignar måste revideras i efterhand. Följderna av detta kan bli ökade kostnader och ökad miljöpåverkan då både mer tid och material går åt till att åtgärda felen. En undermålig konceptuell kunskap kan även leda till kollapsar med personskador eller än värre dödsfall, likt kollapsen av Ronan point i London 1968 (MacLeod, 2016).

1.2 Syfte och Mål

Syftet med denna rapport är att undersöka möjligheten att automatisera konstruktionsberäkningar för stomstabilisering vid ett tidigt skede. Intresset för detta ligger i det faktum att den konceptuella designprocessen är en snabb och intensiv beslutsprocess där grunden till flera beslut är baserad på tidskrävande beräkningar. I det tidiga skedet tas beslut om stomstabiliseringen. Det är en viktig aspekt vid utformningen av byggnaden då konceptuella fel kan få leda till stora konsekvenser.

Automatiseringen ska genomföras med hjälp av det parametrisiska designverktyget Grasshopper 3D som är ett insticksprogram till ritprogrammet Rhino 3D. I Grasshopper skall ett skript för stomstabiliseringsberäkningar tas fram. Skriptet ska testas mot två fallstudiebyggnader; en lite enklare modell för att kontrollera själva skriptet och en mer avancerad modell för att se hur irregulära byggnader påverkar resultatet. Skriptets noggrannhet ska sedan jämföras med handberäkningar och FEM-analyser för kontroller av indata och resultat. Handberäkningarna sker parallellt för att löpande kontrollera beräkningar och resultat i Grasshopper. FEM-analysen sker i slutet för att jämföra resultaten från Grasshopperskriptets analys. Även skriptets användarvänlighet skall utredas för att undersöka vilka för- och nackdelar som finns jämfört med de två andra beräkningsmetoderna.

1.3 Omfattning och avgränsning

I denna rapport kommer fokus ligga på Konceptuell design. Detta medför vissa begränsningar:

- Alla bjälklag antas vara styva nog att kunna föra över all last till de stabiliserande enheterna.
- Endast stomstabilisering och stjälpning beaktas. Inga väggar, bjälklag eller fundament detaljberäknas.
- Endast ett stabiliseringssystem av skjuvväggar kommer att analyseras.
- Endast vindlast mot väggar (ej tak) och snedställningslast beräknas då det är skillnader som ska kontrolleras/beräknas.

- Vindlastens påverkan på systemet analyseras endast i en riktning då verifikation av handberäkningar tar för lång tid för att räkna i två led och det tillför inget större värde till rapporten. Osäkerheter i modellen kontrolleras genom en irregulär byggnad i fallstudie två.

1.4 Arbetsmetod

Först genomförs en övergripande litteraturstudie som täcker in områdena kring parametrisk- och konceptuell design, stomstabiliseringsmodeller samt utforskar en beräkningsmodell som kan nyttjas i det tidiga skedet.

Det valda stomsystemet tillsammans med beräkningsmodellen för ett rotationscentrum parametreras i Grasshopper och ett skript för strukturanalys skapas. Tanken bakom skriptet är att kunna optimera placeringen av de stabiliserande enheterna efter parametrar som exempelvis den storlek på fundament som behövs för att stå mot det stjälpande momentet. Den stora fördelen och en av anledningarna att vi valt Grasshopper är den direkta visualisering som genereras i Rhino 3D.

En fallstudie genomförs för att undersöka skriptets riktighet och användarvänlighet. Två byggnader, en simpel och en mer avanceradbyggnad, tas fram med syfte att undersöka de begränsningar som finns på grund av byggnadens geometriska utformning.

Noggrannheten hos beräkningarna och alla antaganden i skriptet verifieras sedan genom handberäkningar av samma beräkningsmetod. Resultaten jämförs därefter med FEM-analys i Robot Structural Design.

1.5 Rapportöversikt

I kapitel 2, Litteraturstudie, återfinns en övergripande förklaring av konceptuell design, parametrisk design och hur de kan användas tillsammans eller var för sig. Vidare ges en yttlig beskrivning av de vanligaste typerna av stomstabilisering som används i Sverige och världen.

Kapitel 3, Metod, behandlar de metoder som kommer användas genom arbetets gång. Både övergripande angreppsmetoder samt detaljerade beräkningsmetoder beskrivs och förklaras här.

Kapitel 4, Grasshopperskriptet, redovisar i detalj hur det framtagna grasshopperskriptet fungerar. Detta kapitel motsvarar en stor del av projektets resultat.

I kapitel 5, Fallstudie, beskrivs två olika typhus som använts i syfte att kontrollera att det program som tagits fram genom detta arbete. I fallstudien beskrivs hur de olika beräkningsmododeller nyttjats, vilka begränsningar som krävts och hur en optimering med hjälp av programmet kan se ut.

I kapitel 6, Resultat, beskrives utfallet av höstens arbete. En utförlig beskrivning av vad Grasshopperscriptet kan utföra står att finna i kapitel 4, när det kan användas och var. Här beskrivs primärt beräkningsresultat från de fallstudien och de beräkningar som gjorts för att verifiera riktigheten i de beräkningar som GH-programmet gör.

Slutsatsen av allt arbete står att finna i kapitel 7, Slutsats och diskussion. Här beskrivs ytterligare användningsområden för GH-programmet och möjliga vägar att utveckla programmet.

2 Litteraturstudie

2.1 Konceptuell design

Konceptuell design innebär övergripande lösningar där tillvägagångssätt och geometri ligger i fokus som sedan detaljdimensioneringen baseras på. Det skulle kunna kallas för utvecklingsprocessen för en byggnad då det är i denna fas ideérna som ligger bakom lösningen skapas. Ideérna i fråga dimensioneras med enklare överslagsmetoder och tumregler för att snabbt få en överblick hurvida resultatet är rimligt och genomförbart i sin nuvarande utformning. Det är således i denna fas som större förändringar är genomförbara utan större merkostnader.

Vid detta skede finns bara övergripande programhandlingar med beställarens behov definierad. Med dem som grund påbörjar arkitekten skissandet av byggnadens yttre utformning som sedan konstruktören dimensionerar för att tillgodose byggnadens stabilitet. Med ett utökat samarbete mellan arkitekter och konstruktörer i detta skede kan en byggnad effektiviseras i sin utformning genom att arkitekten tidigt vet vilka stabiliserande enheter som behövs och kan sedan väva in dem som en del av byggnadens utseende och på så vis öka det arkitektoniska värdet hos det stabiliserande systemet.

I ett tidiga skeden krävs det att snabba beslut tas som inte är grundade i några längre beräknings analyser men ändå är tillräckligt noggranna. För att inte begränsa möjligheterna till arkitektoniska utformningar kan däremot inga avancerade analyser genomföras då dessa kräver en fastställd geometri och funktion.

2.2 Parametrisk design

Parametrisk design är en algoritmbaserad designprocess som inkluderar och parametriserar variabler i designprocessen och styr dess förhållanden emellan varandra genom regler och definitioner. Med algoritmbaserad design tillsammans med datorkraft kan mer komplexa geometrier tas fram och analyseras inom ramen för ett rimligt tidsspann. Dessa former kan optimeras för rent drag och tryck som i sin tur kan dimensioneras och vid intresse tillverkas. En känd användare av parametrisk design var den Spanske arkitekten Antoni Gaudí som bland annat ritat La Sagrada Família med hjälp av fysiska parametriska modeller, se figur 2.1.

I modern tid används sällan fysiska modeller för parametrisk modellering utan med hjälp av datorprogramvaror som Grasshopper och Dynamo kan med några knapptryck avancerade modeller genereras och analyseras.

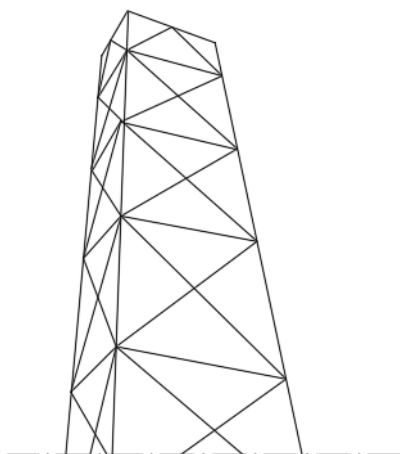


Figur 2.1: En upp- och nedvänd kraftmodell av Colònia Güell, Sagrada Família Museum. (Commons, 2017a)

2.3 Kombinationen Konceptuell- och Paramet-risk design

Genom att i ett tidigt skede påbörja samarbetet mellan konstruktörer och arkitekter kan mer effektiva byggnader tas fram. Detta kan göras genom att låta utforma det stabiliserande systemet tidigt och låta dess form följa genom designprocessen och vara en del av strukturen från start istället för att försöka efterkonstruera ett system som tillgodoser stabiliteten. Detta kan i sin tur generera mer “ärligt” utformade byggnader där byggnadens funktion blir tydlig. T.ex Hancock Center är ett exempel på en byggnad där det stabiliserande systemet fått en framtonad utformning medans t.ex. Turning Torsos stabiliserande system är dolt i kärnan fast det ser ut som att det sitter utanpå, se Figur 2.3.

Ett samarbete i detta tidiga skede genererar inte bara bättre effektivare byggnader utan kan också minska byggnadskostnader avsevärt då materialmängder kan minimeras och därmed spara in både arbetad tid och materialkostnader.



Figur 2.2: Sketch över Hancock center's stabiliserande system

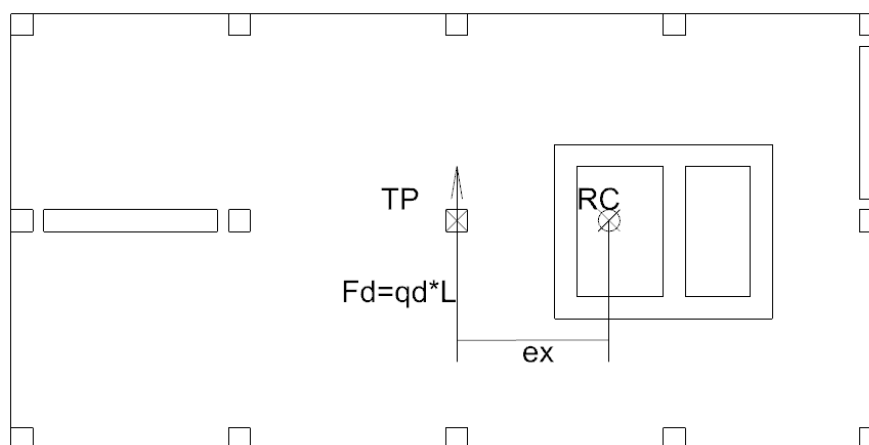


Figur 2.3: Turning Torso (Commons, 2017b)

2.4 Beräkningsmetod

Höga byggnader påverkas av stora horisontella laster som vind och snedställningslast. Det horisontellt stabiliserande systemet ska stå emot bland annat stjälpning och ett vridande momentet i planet. Stjälpning innebär väldigt förenklat att byggnaden vid horisontell belastning "välter". Det vridande momentet måste hållas emot av de stabiliserade enheterna för att det inte ska uppstå en rotation. För en byggnad med flera stabiliserande enheter i båda riktningarna är oftast inte det vridande momentet problemet eftersom hela byggnaden samverkar som en solid enhet. Däremot är systemknäckningslasten ofta det kritiska för byggnadens stabilitet.

För en icke symmetrisk byggnad sammanfaller inte rotationcentrum med tyngdpunkten för byggnaden. För dessa byggnader kommer en jämnt utbredd horisontallast att ge upphov till ett vridande moment som de stabiliserande enheterna måste kunna hålla emot. Detta på grund av att Kraftresultanden som verkar i tyngdpunkten och får en excentricitet från byggnadens rotationcentrum, se Figur 2.4. Positionen av rotationscentrum beror på de stabiliserande enheternas styvhet och position. Stabiliserande enheter placerade långt från rotationcentrum ger en stor vridstyvhet i planet. Stabiliteten för en byggnad ökar också med antalet stabiliserande enheter. För att veta hur stor last varje enhet utsätts för görs en horisontell lastfördelning baserad på de stabiliserande enheternas avstånd från rotationscentrum samt dess styvhet.



Figur 2.4: Excentrisk kraftresultant från från utbredd last

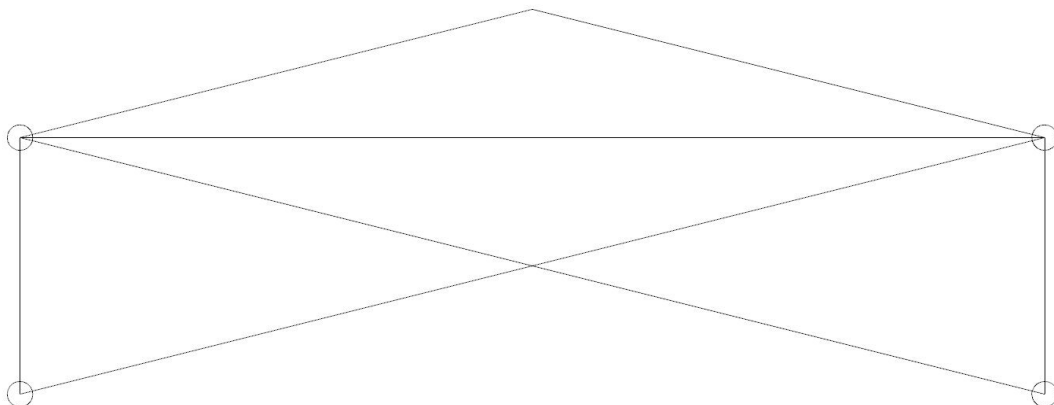
2.5 Stomstabilisering

Stommen i en byggnad är den samling enheter som tillsammans samverkar och bildar ett stabiliserande skelett. Stommens primära uppgift är att förhindra att byggnaden rasar. Den dimensioneras och utformas därför för att motstå stora vertikala samt horisontella laster som kan uppstå inte bara från byggnaden i sig utan även alla yttre laster. I Sverige kommer de huvudsakliga lasterna från snö och vind men i vissa delar av världen dimensioneras även stommen för jordbävningar. Ur en fastighetsförvaltares perspektiv ses stommen som en negativ byggdel då den tar plats och minskar den uthyrbara ytan, kräver underhåll och ofta är kostsam (Lorentsen et al., 2000). Detta tillsammans med den komplexitet som kan finnas ur både konstruktions-, arkitektoniska samt installationsperspektiv ger en anledning för projektörer att tidigt samarbeta och öka möjligheterna för att hitta den bästa lösningen. Kostnaden för stommen är direkt kopplad till byggnadshöjden då bjälklagskostnaden förblir densamma men de stabiliserande enheternas samt pelarnas kostnad ökar i takt med att bruttoarean ökar och är därför en viktig post att se över vid projektering av höga byggnader.

2.5.1 Fackverk

Fackverket består av ett system av pendelpelare som samverkar för att på ett effektivt sätt ta upp och fördela ut transversella laster. Med en smart vald topologi kan alla element placeras så alla delar i princip bara tar upp last i en riktning. De gör att fackverkets utformning optimeras efter behov och det ger en lätt konstruktion i förhållande till sin goda bärförmåga. Vanligtvis utformas fackverk av stål eller trä då de båda har draghållfasthet.

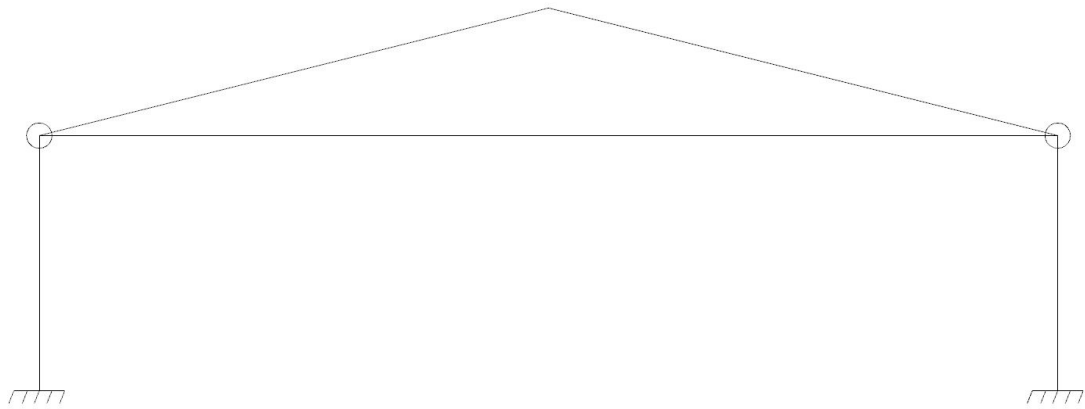
Ur ett strukturellt perspektiv är ett stålfackverk ett av de bästa sätten att stabilisera konstruktioner på höjden och längden tack vare dess höga styvhet i förhållande till materialåtgång. Detta utnyttjades mer flitigt förr i tiden och t.ex Älvsborgsbron är ett tidigt exempel då fackverk nyttjades för att bygga. Nu mer används sällan rena fackverkskonstruktioner som stabilisering till höga byggnader med fönster. De snedsträvor som krävs kan utgöra ett arkitektoniskt hinder. Stora balkar i ögonhöjd vid fönstren är ej uppskattat av särskilt många. Idag används fackverkskonstruktionen i stor utsträckning vid utformning av större hallbyggnader.



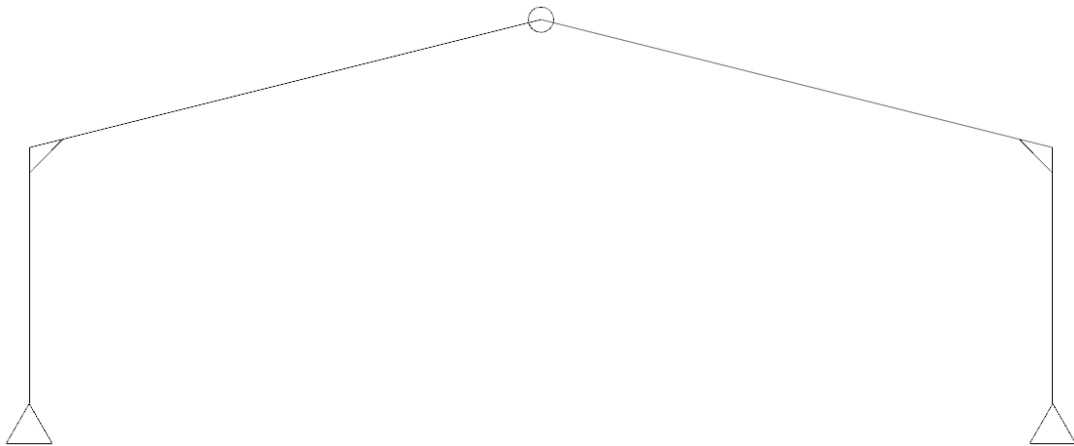
Figur 2.5: Avstyvning av byggnad med hjälp av fackverk utfört i form av ett vindkryss som enbart tar upp drag, pelare och balk tar upp tryck.

2.5.2 Ramverket

Ett system som nyttjar ramverket kan utföras på ett flertal olika sätt, de vanligast förekommande är ett pelar- och balksystem, Figur 2.6, eller en treledsram, Figur 2.7. Gemensamt för alla olika system är att en eller flera övergångar mellan vertikala och horisontala element sammanfogas på ett sådan sätt att momentkrafter kan föras genom kopplingen det vill säga momentstyva anslutningar. I fallet pelar- och balksystem spänns pelarna fast i botten och ledas i övergången till balkarna. Med fler än en momentstyv koppling i ett system uppnås ett statiskt obestämt system. För att uppnå samma statiskt bestämda system kan en treledsram användas. Detta är en vanlig typkonstruktion för hallbyggnader då den är både lätt att analysera och utföra. En fri led införs i nocken samt att den tack vara leden i nocken inte blir lika sättningskänslig. Till skillnad från det fast inspända pelar-balksystemet behöver treledsramen stabiliseras vinkelrätt mot ramens fästpunkter vilket kan göras med takåsar eller liknande. Pelar- och balksystem, så kallade pelardäck, är även ett vanligt sätt att bygga flervåningshus där stora öppna ytor utan underliggande balkar är av intresse till exempel för kontorslokaler. De fasta inspänningarna blir dock kostsamma att utföra för större moment och detta system kräver ytterligare stabiliserande element till exempel skjuvväggar eller en stabiliserande kärna för att hålla kostnaderna nere och tillåta pelarna att verka som pendelperlare.



Figur 2.6: Pelar- och balksystem med momentstyv pelarinfästning i botten och ledad anslutning mellan balk och pelare



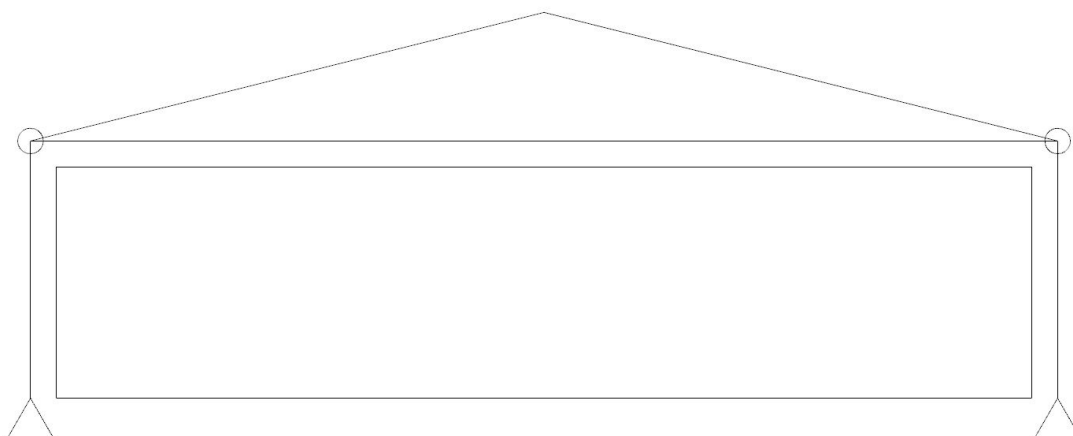
Figur 2.7: Treledsram med momentstyva hörn och fixlagerinfästning i botten samt fritt ledad i toppen.

2.5.3 Skivverkan

Den tredje metoden för stabilisering är så kallad skivverkan och har utnyttjats flitigt redan från husbyggandets början. Här används stabiliserande skivor i form av skjuvväggar. Dessa skivor, ofta rejäla platsgjutna väggar för höghus, är stabila för belastning i sitt eget plan och förhindrade från buckling men behöver förhindras från rotation vid belastning vinkelrätt skivan (Isaksson et al., 2005). De kan utföras av alla olika tänkbara byggnadsmaterial som murat tegel, platsgjuten betong, träski-

vor med flera. För att uppnå en stabil konstruktion av skjuvväggar krävs minst tre placerade väggskivor vars plan ej skär varandra i samma punkt samt en horisontell takskena som binder samman de tre vertikala. Detta ger en självstabiliserande enhet som även motstår rotation på grund excentrisk last, till exempel vindlaster vars resultat ej angriper i byggnadens rotationscentrum. Så länge alla skivor och dess anslutningar är styva nog har längden ingen betydelse för stabiliteten utan endast antalet samt dess positioner är avgörande (Isaksson et al., 2005). Detta kan utnyttjas och flera sammansatta självstabiliserande enheter kan radas upp och staplas på varandra för att på så vis skapa flervåningshus utan att det stabiliserande systemets funktion förändras.

Tidigt utnyttjades effekten från skivverkan vid stora massiva murade konstruktioner med endast små perforeringar för fönster, dörrar och ytterligare genomföringar. Denna effekt kan även uppnås då spontade brädor sammanförs för att skapa skivor och används vid i småhus och mindre taktytor.



Figur 2.8: Avstyvning av byggnad med hjälp av Skivverkan

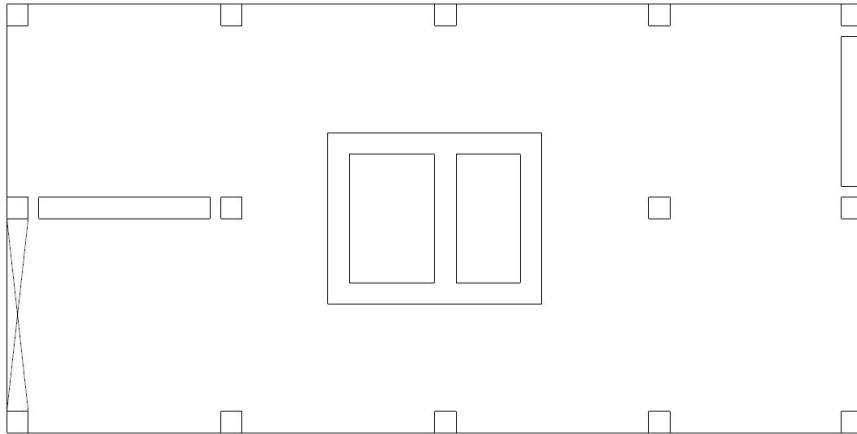
2.5.4 Stabiliserande kombinationer av system för högre byggnader

Skelettstommen, en vanligt förekommande typ av stabilisering för byggnader där stora öppna planlösningar eftersträvas. Figur 2.9, visar ett system av pelare, balkar och bjälklag som samverkar för att tillgodose stabilitet i både vertikal- och horisontalled. Dess stabilisering kan utföras på olika sätt beroende på hur hög byggnaden är. För låga byggnader

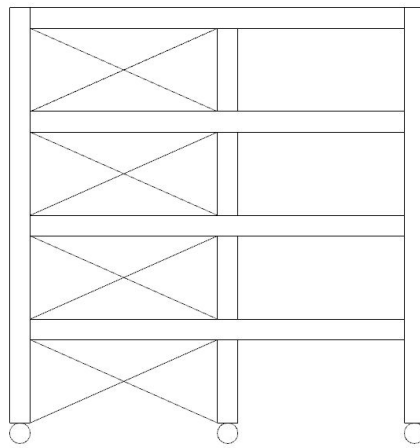
kan pelarna utformas och dimensioneras med en så pass hög böjstyvhet att de i sig tillgodoser stabiliseringen i både horisontal- och vertikalled (ramverkan). Denna typ av stabilisering används dock sällan då de momentstyva anslutningarna som krävs snabbt blir opraktiska och kostsamma (Isaksson et al., 2005).

En mer effektiv och vanlig lösning är att utnyttja befintliga hisschakt eller trapphus för att uppnå tillräcklig horisontalstabilitet, se Figur 2.9. Denna metod ställer dock lite högre krav på bjälklagets möjlighet att föra över krafter i horisontalled då de horisontella lasterna förs från ytterväggen genom bjälklagen ut till de stabiliserande enheterna. Skulle inte det potentiella hisschaktet räcka för stabilisering kan de med lätthet kombineras med en eller flera skjuvväggar (skivverkan) eller fackverk som med fördel placeras i ytterväggarna, se Figur 2.9 och 2.10.

Beroende på stommens utformning i förhållande till byggnadens yttergeometri kan en excentrisk last ge upphov till ett vridmoment kring en vertikal axel i byggnadens rotationscentrum. För att motverka det vridande momentet krävs således en viss vridstyvhet i stommsystemet och hos dess stabiliserande komponenter. Om lasten istället angriper genom byggnadens rotationscentrum längs x- eller y-axeln kan de horisontalstabiliserande enheterna modelleras och dimensioneras som fast inspända vertikala balkar (Isaksson et al., 2005). För att uppnå ett så vridstyvt system som möjligt skall alla stabiliserande enheter placeras så långt från rotationscentrum som möjligt. Detta tillsammans med att det finns minst tre väggskivor eller fackverksenheter vars plan ej skär genom en och samma punkt ger ett stabilt system. (Isaksson et al., 2005)



Figur 2.9: Skelettstomme i planavstyvad med vindkryss, hissschakt samt två stabiliserande väggar



Figur 2.10: Skelettstomme i profil, avstyvad med vindkryss, hissschakt samt två stabiliserande väggar

Vid stabilisering av mycket höga byggnader räcker det inte med att tillgodose byggnadens stabilitet ur hänsyn till stjälpning och brott utan här väger även horisontella rörelser in. Rörelsen beror av byggnades styvhet, massa samt ett eventuellt dämpande system. Den maximala horisontella accelerationen som kan uppstå innan den upplevs som obehaglig är ca 0,005g (Lorentsen et al., 2000). Om denna överskrids innebär det att styvheten för en byggnad behöver ökas. Ofta räcker inte de konventionella metoderna för byggnader som räcker upp till ca femton våningar. Därför har ett antal sammanslagningar av de olika metoderna arbetats

fram och i ett diagram från (Lorentsen et al., 2000) redovisas hur olika metoder kan kombineras.

En vanlig metod för att bygga höga svängingsstabila byggnader är att utforma dess omkretsande fasad som ett fast inspänt rörtvärsnitt i grunden. I mitten av röret placeras en kärna i form av hiss, trapp och installationsschakt som inte bara hjälper till med stabiliteten utan underlättar och tillgodoser den vertikala transporten genom byggnaden. Det yttre röret samt kärnans samverkan kan styras och beroende på byggnadens höjd kan systemets styvhet ökas eller minskas efter behov genom att styvt sammanlänka de båda vid olika nivåer. Fler sammanlänkningar ger ett styvare system och således lägre horisontalaccelerationer men ökar i sin tur byggkostnaden.

En annan metod är att bygga ett pelar- & balksystem med momentstyva knutpunkter genom hela byggnaden. Det gamla World Trade Center var byggda enligt denna metod. Det ger ett stabilt system men blir snabbt kostsamt på grund av de styva anslutningar som krävs mellan varje byggdel.

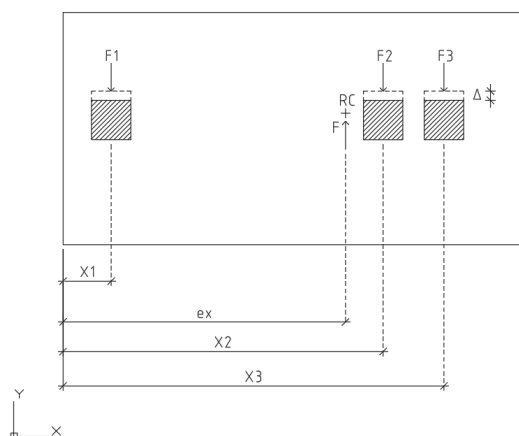
Ytterligare ett alternativ är att bygga ett system av så kallade "diagonaliserade tubes". Det är ett byggnadssätt där varje fasadsida utgör ett fackverk i sitt eget plan och blir således med enkla hjälpmedel högst stabilt. Men liksom övriga fackverkskonstruktioner uppstår diagonaler i fasaden som behöver hanteras ur ett arkitektoniskt perspektiv varför denna modell bör bestämmas för att användas i ett tidigt skede. Exempel för denna byggnadstyp är Hancock Center i Chicago, se Figur 2.2.

3 Metod

I verktyget Grasshopper görs automatiseringen av stomstabiliserings beräkningen. Beräkningarna av horisontella lastfördelningen baseras på en metod från boken *bygga med prefab* som betongelementföreningen gav ut 1998.

Rotationscentrums position är av stor vikt vid fördelningen av lasten i metoden. Figur 3.1 visar en skiss på en byggnad och dess rotationscentrum. F_1 , F_2 och F_3 i figuren är reaktionskrafter från de stabiliserande enheterna. Rotationscentrum definieras som den punkt, e som multiplicerat med kraften F blir lika med reaktionskrafterna multiplicerat med deras hävarm. Denna jämvikt redovisas i ekvationen 3.1.

$$F \cdot e = F_1 \cdot x_1 + F_2 \cdot x_2 + F_3 \cdot x_3 \tag{3.1}$$



Figur 3.1: Teckenförklaring för beräkning av Rotationscentrum

Horisontella laster som verkar på en byggnads förs via bjälklagen på varje våningsplan till de stabiliserande enheterna som för ner lasten i

marken. Lasterna ger upphov till ett moment på enheten som den måste kunna stå emot för att inte stjälpas. Ett tillhörande fundament hjälper enheten att stå emot det stjälpande momentet. Fundamentet gör att hävarmen till den mothållande kraften kan förlängas. Fundamentet hjälper även att fördela ut den vertikala lasten på en större area så marken under enheten klarar av lasten. Ett sämre alternativ på stabiliserande system bidrar till ett större stjälpande moment och veka enheter kräver större fundament vilket är sämre ur både ett ekonomiskt och miljömässigt perspektiv. Att utforma skriptet så att de genererar fram fundament till enheterna så att de ska klarar deras stjälpande moment ger därmed direkt få återkoppling på hur stomkonfigureringen påverkar ekonomiskt samt miljömässigt.

För att synliggöra alla beräkningar och data testas skriptet mot två fallstudier. De två fallstudiebyggnaderna, Hus-ett och Teliabyggnaden visas senare i rapporten i figur 5.1 och 5.6. Den första studien är av ett enklare slag och består av ett fiktivt hus med räta linjer, raka väggar och kvadratiska schakt, detta för att minimera risken för räknefel vid verifiering med handberäkningar. Fallstudie nummer två är en applicering av skriptet mot en befintlig byggnad i Malmö. Denna byggnad är U-format med stabiliserande enheter som inte ter sig räta jämnt mot ytterväggarna i byggnaden. Denna studie görs för att se hur skriptet hanterar irregulära byggnader.

För att verifiera riktigheten hos skriptet utförs handberäkningar med syfte att kontrollera indatan samt beräkningarna i skriptet. Parallellt med detta genomförs en enklare FEM-analys av byggnaden med syfte att kontrollera utdatan och jämföra hur lastfördelningen skiljer sig mellan två olika beräkningsmetoder.

3.1 Beräkningsmodell

I detta avsnitt beskrivs mer detaljerat beräkningsmetoden för horisontallastfördelning från boken bygg med prefab.

Först beräknas de enskilda enheternas tyngdpunkt (x_i, y_i) . För dubbelsymmetriska tvärsnitt sammanfaller tyngdpunkten med mittpunkten men för osymmetriska tvärsnitt beräknas tyngdpunkten enligt ekvationerna 3.2 och 3.3 nedan.

$$x_i = \sum (A_i * x_{tp,i}) / A_{tot} \quad (3.2)$$

$$y_i = \sum (A_i * y_{tp,i}) / A_{tot} \quad (3.3)$$

Där A_i är en delarea, A_{tot} är enhetens totala area och $x_{tp,i}$ och $y_{tp,i}$ är en delareas tyngdpunkt.

Efter det att enheternas tyngdpunkter beräknats kan tröghetsmomenten I_x och I_y beräknas. De beräknas med integraler enligt ekvation 3.4 och 3.5.

$$I_x = \iint y^2 dA \quad (3.4)$$

$$I_y = \iint x^2 dA \quad (3.5)$$

För rektangulära enheter med sidor parallella med x- och y-axeln kan tröghetsekvationerna 3.4 och 3.5 skrivas om som 3.6 respektive 3.7. b och h motsvarar bredden och höjden på rektangeln.

$$I_x = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (3.6)$$

$$I_y = \frac{h \cdot b^3}{12} \quad (3.7)$$

För enheter bestående av sammansatta rektanglar används Steiner's sats hämtad ur (Isaksson and Mårtensson, 2008) för att beräkna varje enhets sammanlagda tröghetsmoment. Steiner's sats beräknas enligt ekvationerna 3.8 och 3.9

$$I_x = \sum (I_{x0} + d_y^2 * A_i) \quad (3.8)$$

$$I_y = \sum (I_{y0} + d_x^2 * A_i) \quad (3.9)$$

I_{x0} och I_{y0} i ekvationerna ovan är delarnas tröghetsmoment, d betecknar avståndet mellan en dels tyngdpunkt och tyngdpunkten för hela enheten och A_i är delens area.

Efter att enheternas tyngdpunkt och tröghetsmoment definierats kan koordinaterna (e_x, e_y) för byggnadens rotationscentrums beräknas med ekvation 3.10 och 3.11.

$$e_x = \frac{\sum(x_i \cdot I_{xi})}{\sum I_{xi}} = \frac{x_1 \cdot I_{x1} + \dots + x_n \cdot I_{xn}}{I_{x1} + \dots + I_{xn}} \quad (3.10)$$

$$e_y = \frac{\sum(y_i \cdot I_{yi})}{\sum I_{yi}} = \frac{y_1 \cdot I_{y1} + \dots + y_n \cdot I_{yn}}{I_{y1} + \dots + I_{yn}} \quad (3.11)$$

Slutligen fördelas den dimensionerande horisontella lasten mellan enheterna. Detta görs enligt ekvation 3.12 och 3.13 där r betecknar avståndet mellan enhetens tyngdpunkt och rotationcentrum. Beräkningen av nämnaren förtydligas i ekvation 3.14.

$$Q_{xi} = q_y \cdot L \cdot \left(e_x - \frac{L}{2}\right) \cdot \frac{r_{yi} \cdot I_{yi}}{\sum r_i^2 \cdot I_i} \quad (3.12)$$

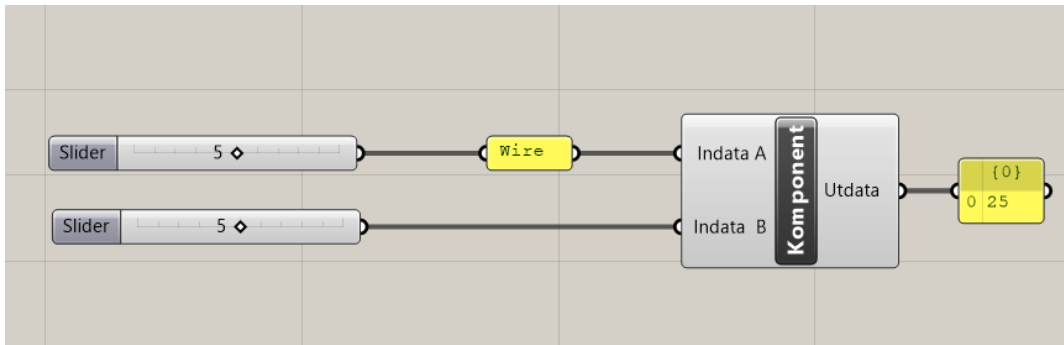
$$Q_{yi} = q_y \cdot L \cdot \left(\frac{I_{yi}}{\sum I_x} + \left(e_x - \frac{L}{2}\right) \frac{r_{xi} \cdot I_{xi}}{\sum r_i^2 \cdot I_i}\right) \quad (3.13)$$

$$\sum r_i^2 \cdot I_i = \sum ((e_x - x_i)^2 \cdot I_{xi} + (e_y - y_i)^2 \cdot I_{yi}) \quad (3.14)$$

3.1.1 Grasshoppermodellering

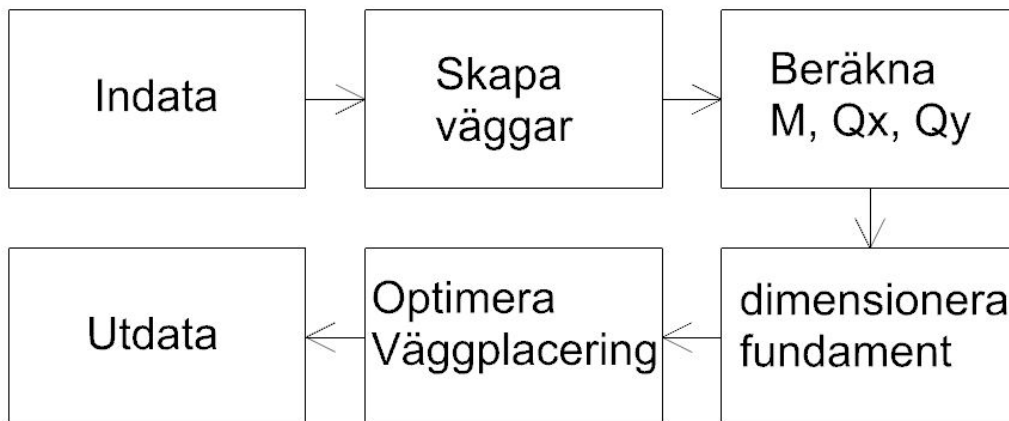
Programmet Grasshopper skript skapas. Skripten byggs upp utav komponenter och wirar. Wirarna förser komponenterna med indata samt skickar vidare dess utdata till nästa komponent. I komponenten sker själva uppgiften eller beräkningen. Olika komponenter kan genomföra olika typer av uppgifter. Tillexempel en multiplikations komponent multiplicerar sin indata och skickar vidare produkten av indatan. Vissa komponenter hämtar sin indata från Rhino 3D. Tillexempel en komponent kallad Point läser in information för en punkt ritad i Rhino.

I Grasshopper finns även möjligheten att lätt ändra variabla värden. Detta görs genom att använda en komponent kallad slider. Se Figur 3.2



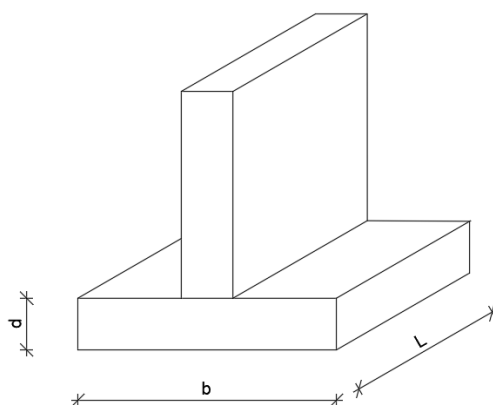
Figur 3.2: Grasshopper Canvas

Skriptet som byggs upp i grasshopper är baserat på beräkningarna från boken bygga med prefab. I kapitel 4 görs en mer noggrann beskrivning av skriptet. Kortfattat är skriptet utformat som så att en uppsättning fördefinierad data läses in i skriptet, t.ex. byggnadens yttre geometri, fasta stabiliserande hisschakt-, trapphus och enheter samt lastdata. Därefter genereras skjuvväggar vars utformning och position devinerats med sliders. Utifrån denna modell kan de horisontella laster samt de stälpande momentet beräknas. Med dessa lastvärden som grund kan enklare fundament uppskattas. När ett antal olika konfigurationsarter av väggplaceringar genomförts och jämförts kan lösningen konvergera mot något som liknar en optimal väggplacering avseende betongmängd i byggnaden. Figur 3.3 visar översiktligt hur programmet är uppbyggt.



Figur 3.3: Schematisk beskrivning på uppbyggnaden och användandet av Grasshopperskriptet

För att ett fundamentmått ska kunna beräknas fram måste flertalet antaganden göras. Dels uppskattades fundamentets vikt, dess bredd och dess tjocklek. Eftersom skjuvväggar är styvast i sin längstriktning antogs en fast bredd, b för att sedan kunna beräkna en längd L i väggens längstriktning, se figur 3.4. Fundamentstorleken ska klara att hålla emot det stjälpande momentet och ta hänsyn till jordtrycket så att marken klarar lasten. Därmed är jordspänningen också avgörande för fundamentstorleken. Skriptet resultat visar stjälpande momentet och stabiliserandemomentet både för enbart väggen och för fallet då väggen och fundamentet samverkar.



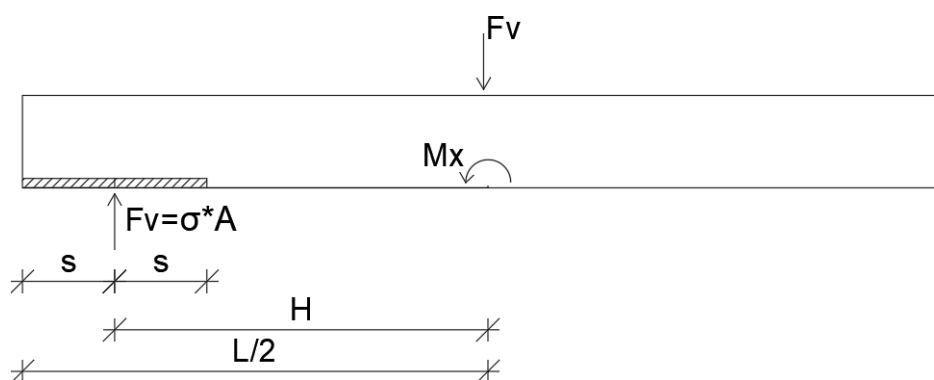
Figur 3.4: Definierar tjocklek, d , bredd, b , och längd, L för fundament

3.1.2 Handberäkningar

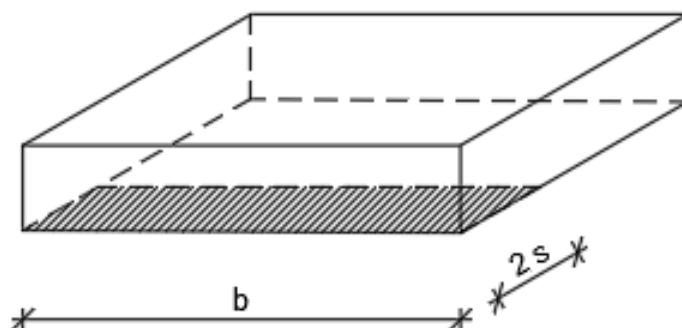
Handberäkningarnas syfte är att kontrollera de beräkningar som görs i programmet Grasshopper är korrekta. Handberäkningarna följer därmed också metoden i avsnitt 3.1 vid beräkning av horisontella lastfördelningen. Horisontella lasten beräknas om till ett stjälpande moment som sedan också jämförs. Då de följer samma modell kan jämförelsen av metoderna inte säga något om resultatet från skriptet ger en korrekt bild av verkligheten. Däremot kan det verifiera att programmet fungerar som det är tänkt och om automatisering är korrekt.

Som bestrivits i avsnitt 3.1.1 beräknades fundamentvolymen fram i grasshopper. Med handberäkningar kontrollerades dessa fundament genom

att kontrollera ifall enheterna klarade hålla emot de stjälpande momenten alltså kontrolleras fundamentens tjocklek, bredd och längd som beräknats fram i Grasshopper. Då fundamenten även dimensionernas för att tillsammans med jordtrycket klara den vertikala lasten görs även en kontroll på detta. Beräkningarna gjordes i Excel där först en lastnedräkning utfördes. Sedan beräknas momentet M_x vid fundamentets underkant. Genom att dividera momentet med den vertikala lasten erhålls den hävarm, H som är avståndet mellan fundamentets mitt och där den mothållande kraften verkar, se figur 3.5. Genom att sedan ta halva fundamentlängden minus hävarmen så erhålls halva längden för den tryckta arean som beskrivs som S i Figur 3.5. Den maxiamla lasten som enheten klarar kan sedan beräknas genom att jordtrycket multipliceras med den tryckta arean som definieras i Figur 3.6. Till sist beräknades utnyttjande graden kontrollerades genom att vertikala lasten dividerades med kapaciteten.



Figur 3.5: Bild på trycktaaren, den mothållande kraften och dess hävarm



Figur 3.6: Bild på den tryckta arean

3.1.3 FEM

För att bygga upp en FEMmodell krävs en viss mängd indata och ett antal definierade parametrar. Ett flertal av dessa som till exempel byggnadens utformning och bärande system samt ytlaster kan vara svårbedömda i ett tidigt skede. Syftet med fem-modelleringen i denna rapport är endast att verifiera riktigheten i de beräkningar som görs av grasshopperskriptet varför de annars okända parametrarna definieras i detta syfte för de två fallstudierna.

Som indata till Robot behövs en tilltänkt byggnad med dess geometriska egenskaper och de karaktäristiska laster som verkar på byggnaden. De nödvändiga parametrarna punktats upp nedan samt arbetsflödet för fem-modellering i Robot beskrivs kortfattat därefter.

Nödvändig data:

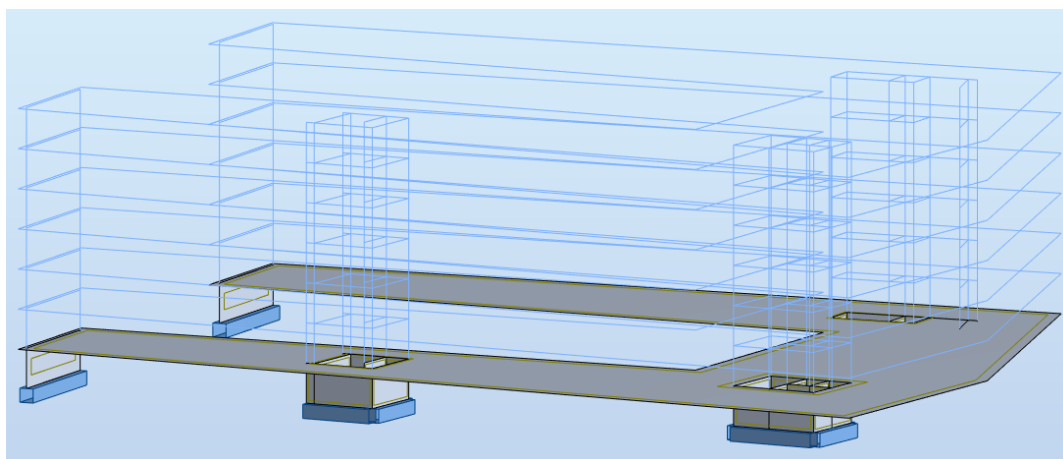
- Byggnadens geometri
- Tilltänkta stabiliserande enheter
 - Antal
 - Dimensioner
 - Materialegenskaper

- Karaktäristiska laster
- Upplagsvillkor

En ritning av den tilltänkta byggnaden läses in i Robot, en A-ritning eller skissad K-ritning på vilken de bärande delarna finns utsatta är tillräcklig. Med ritningen som grund påbörjas modelluppbyggnaden. först definieras de bärande delarnas geometriska och materiella egenskaper:

- Bjäklags- & väggtyp
- Tjocklek
- Material

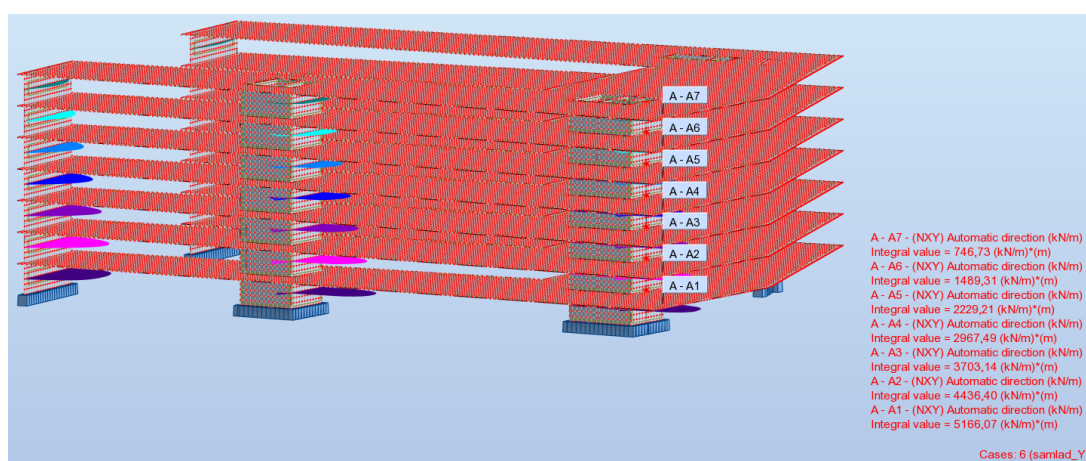
Med definierade väggar och bjälklag kan modellen byggas upp. En symmetrisk modell byggs med fördel upp genom att först bygga en våning med alla bärande väggar, ett bjälklag samt all håltagning genomförd varefter denna våning kopieras på höjden tills rätt byggnadshöjd är uppnådd, se Figur 3.7.



Figur 3.7: Robotmodell under uppbyggnad

Alla anslutningar är om inget annat angets momentstyva per standardutförande i Robot. Det innebär att Väggarna som staplas på varandra ses som fast inspända i varandra och verkar som en byggnadshög enhet samt att bjälklaget sitter fast inspänt i väggarna. Bjälklagets tröghetsmoment reduceras till ca 10% för att undvika inslag av ramverkan i modellen, förutsatt att det inte är något som eftersträvas. Håltagning för schakt

görs längs insidan av schakten av programtekniska skäl. Eftersom intresset endast ligger i att analysera den bärande stommen modelleras både väggar och bjälklag som skal-enheter vilket i praktiken innebär att de saknar tyngd och orimliga deformationer i systemet undviks. Upplagen under de stabiliserande väggarna modelleras som fast inspända för att liknas vid de fundament som efter modellering ska storleksbestämmas. Ett annat rimligt antagande vore här att modellera fundamenten som styva fjädrar med viss möjlighet till rotation. Lastberäkningar genomförs med vind som huvudlast och snedställningslast som sekundärlast och kontrolleras med lasten liggandes i antingen x-led eller y-led. Vindlasten läggs in som en horisontell linjelast längs den för lastfallet intressanta bjälklagskanten och snedställningslasten som en horisontell ytlast verkande i samma riktning som vindlasten.



Figur 3.8: Robotmodell meshad och redo för analys med hjälp av funktionen Panel Cuts.

Från FEM-modelleringen kan de tvärkrafter samt upplagskrafter som verkar på systemet läsas ut, se Figur 3.8. Med hjälp av dem kan sedan både ett moment verkande i botten samt de horisontella lasterna Q_x och Q_y tas fram. Q_x och Q_y beräknas som skillnaden mellan den horisontella tvärkraftens integralvärde för varje stabiliserande enhet mellan varje våningsplan. Tvärkraften redovisas som integralvärdet över tvärsnittet i mitten på varje våningsplan i höjddled. Detta ger en noggrannhet som är tillfredställande för jämförelse med Grasshopper- och handberäkningsmodellerna. Momentet beräknas som

$$\begin{aligned}
M_1 &= Q_1 * h_1 \\
M_2 &= Q_2 * h_2 + M_1 \\
&\dots \\
M_n &= Q_n * h_n + M_{n-1}
\end{aligned}
\tag{3.15}$$

Q_x och Q_y beräknas genom att tvärkraften från den överliggande våning-
en subtraheras från tvärkraften för underliggande våning.

$$\begin{aligned}
Q_{i,1} &= V_1 - 0 \\
Q_{i,2} &= V_2 - V_1 \\
&\dots \\
Q_{i,n} &= V_n - V_{n-1}
\end{aligned}
\tag{3.16}$$

4 Grasshopperskriptet

4.1 Skriptförklaring

Examensarbetets fokus har huvudsakligen legat på att ta fram Grasshopperskriptet som beskrivits kortfattat i avsnitt 3.1.1. I följande avsnitt ges en detaljerad beskrivning på hur skriptet fungerar.

För att kunna utföra stomstabiliseringsberäkningar behövs först en modell definieras. Skriptet börjar med att läsa in ritningar från ritverktyget Rhino 3D. Skriptet kräver att en yttergeometri samt geometrin för fasta elementen har definierats.

Viss indata som beskriver byggnadens utformning ställs in manuellt. Den indata som behövs visas i tabell 4.1.

Tabell 4.1: Indata till Grasshopper skriptet

Antal våningar
Våningshöjd
Bjälklag tjocklek
Fundament tjocklek
Skjuvväggar bredd
Skjuvväggar kortast tillåtna längd
Pelaravstånd i x- och y-led

Den dimensionerande vindlast, nyttiglast och jordtrycket som beror på vart byggnaden ska stå och vad den ska användas till måste också ställas in manuellt.

Scriptet fortsätter sedan med att rita ut det valda antalet väggar vars längd, position och riktning är definierat i sliders. Det ställs krav på

väggarna för att de ska få ingå i de stabiliserandesystemet. Kraven är att väggarna inte får vara kortare än en viss längd. De får heller inte vara utanför eller korsa byggnadens yttregeometri, väggarna får inte korsa varandra eller de fasta elementen.

När ovanstående steg är utförda kvarstår endast yttergeometrin, fasta enheter samt de väggar som uppfyllt kraven. Tillsammans utgör de den slutgiltiga modellen som beräkningarna utföras på.

Beräkningarna börjar med att samtliga enheters influensarea beräknas. Sedan beräknas byggnadens längd i x-led för att veta längden som den utbredda vindlasten verkar på. Sedan följer skriptet beräkningen som beskrevs i avsnittet 3.1 för att få fram lasterna per enhet. Tillsist kan det stjälpande momentet för varje enhet tas fram.

Beskrivningen nedan beskriver hur fundamentdimensionerna tas fram. Fundamentstorleken ska dimensioneras för att kunna stabilisera enheten mot de stjälpande momentet samt sprida ut lasten så marken under inte går sönder. Då Grasshopper har begränsade möjligheter att utföra iterativa beräkningar försvårades möjligheten att dimensionera ett fundament. Detta resulterade i att vertikala lasten, tjockleken och bredden på fundamentet var tvungen att antas och endast längden på fundamenten kunde dimensioneras.

Det stjälpande moment som uppstår på grund av horisontella laster medför att den mothållande lasten verkar excentriskt från fundamentets mittpunkt. Figur 3.5 visar hur den mothållande kraften F verkar på ett avstånd H från fundamentets centrum. Kraften F är lika med den vertikala lasten, F_v som verkar på marken. Hävarmen H beräknas fram genom att dividera det stjälpande momentet med kraften F enligt ekvation 4.1.

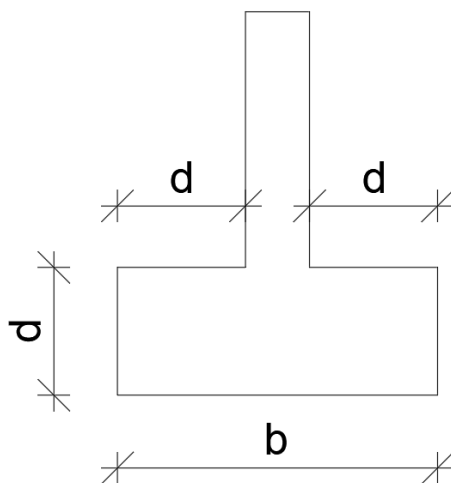
$$H_y = \frac{M_x}{F} \quad (4.1)$$

Vertikala lasten utgörs av väggens- och fundamentets egentyngd, bjälklagets egentyngd och den nyttiga lasten som verkar inom enhetens influensarea. Då Volymen på fundamentet inte än är given måste dennes tyngd uppskattas. Detta är en av de stora bristerna med dimensioneringen, att en tyngd måste uppskattas utan att volymen är given. Arean uppskattas fram genom att addera ett värde till sträckorna för längden och bredden på väggen ovanpå fundamentet. Längden och bredden multipliceras med tyngden för betong och fundamentets djup som ställts in i början.

Ur spricksynpunkt är enheten stabil mot det stjälpande momentet om den mothållande kraften verkar minst en sjättedel av fundamentlängden innanför fundamentets kant (Bergdahl et al., 1993). Scriptet är utformat till att beräkna den minsta möjliga fundamentdimensionen som krävs för att jorden under ska kunna hålla emot vertikala lasten. Hur stort fundamentet är påverkar storleken på den trycktaarean.

För de genererade enheterna kontrolleras vilket av tröghetsmomenten I_x och I_y som är störst för att veta i vilken riktning de är styvast i. De fasta enheterna har i fallstudiernas fall sin styva riktning i lastriktningen. Fundamentbredden är definierad i den veka riktningen för genererade väggar och i x-riktningen för de fasta enheterna.

Fundamentbredden, b uppskattas till väggensbredd plus en fundamenttjocklek, d på vardera sida, se figur 4.1.



Figur 4.1: Bild hur bredden beräknas

Trycktaarea beräknas enligt ekvation 4.1 nedan. Där F_v är den vertikala lasten och σ_v är jordtrycket.

$$A_{tryckt} = \frac{F_v}{\sigma_v} \quad (4.2)$$

Tryckta arean divideras med den uppskattade bredden. Kvoten blir längden på den tryckta arean, vilket motsvarar sträckan $2s$ i Figur 3.6. Till längden adderas sedan dubbla hävarmen och summan av dessa utgör

totala längden för fundamentet. En kontroll görs av den framberäknade längden. Kravet är att fundamentets längd måste överskrida längden på väggen ovanpå.

Till sist när en fundamentvolym är satt kan den verkliga mothålladen kraften beräknas fram. Tillsammans med hävarmen kan det momentkapaciteten för enheten beräknas.

4.2 Skriptbegränsningar

Det finns vissa begränsningar och antaganden som gjorts för att möjliggöra beräkningarna i Grasshopperskriptet. En av de stora begränsningarna är att endast enskilda rektangulära skjuvväggar med en specifik bredd kan genereras. Önskas annan form, eller en sammansatt enhet måste dessa ritas för hand i Rhino 3D och sedan läsas in i som en fast enhet. Att endast rektangulära väggar kan genereras gör att de mer avancerade enheters position och längd inte kan justeras lika lätt.

Ytterligare begränsning är att byggnaden endast kan dimensioneras efter vindlast i y- riktningen enligt koordinatsystemet i Rhino 3D. Scriptet är alltså konstruerat så att byggnadens lovartsida måste vara ritad i första kvadranten och parallell med x-axeln. Ska olika vindriktningar analyseras måste byggnaden vridas manuellt i Rhino 3D.

5 Fallstudie

5.1 Fallbeskrivning

Fallstudien baseras på två byggnader, en enklare byggnad med syfte att kontrollera om Grasshopperskriptet är tillförlitligt samt en mer avancerad byggnad för att undersöka möjligheterna med skriptet.

Den enklare byggnaden, Hus-ett, är en 100 meter lång och 18 meter bred påhittad kontorsbyggnad med sju våningar där varje våning är 3 meter hög. Totalt är huset 21 meter högt och dimensioneras efter att va beläget i Dockan, Malmö. Det stabiliserande systemet för Hus-ett består av fyra skjuvväggar samt ett symmetriskt rektangulärt hisschakt placerade i plan enligt figur 5.1. De bärande systemet och bjälklagen är utfört i platsgjuten betong och stommen är uppbyggd som ett perlardäck-system där de övriga bärande delarna är av stål som ej dimensioneras i detta arbete och är endast av intresse för framtagning av snedställningslast.

Den lite mer avancerade byggnaden, Teliahuset, är en u-formad byggnad med samma geografiska förutsättningar som Hus-ett och finns idag att skåda i Malmö. Det bärande systemet samt antal våningar och våningshöjd är detsamma som för Hus-ett. Anledningen till att endast byggnadens omkrets samt utformning av stabiliserande schakt varierats är att intresset för fallstudien primärt ligger i att undersöka hur Grasshopperskriptet samt beräkningsmodellen som återfinns i boken bygga med prefab hanterar irregulärt utformade byggnader. Genom fallstudien redovisas endast beräkningar och värden för stabiliserande enhet 0 se figur 5.1 för Hus-ett och figur 5.6 för Teliahuset. Resterande siffror och beräkningar redovisas i Appendix B för grasshopperresultat, C för handberäkningar samt D för FEM-resultat.

Av förenklingsskäl förutsätts båda byggnaderna ha samma geografiska läge vilket innebär att de karaktäristika- och dimensionerande lasterna

är de samma för båda fallen. För de båda byggnadernas stabiliserande enheter är det en kombination av utvärdig Vindlast och den horisontella snedställningslast som verkar på bjälklagen som är av intresse att studera.

Snedställningslasten uppkommer genom att de bärande enheterna har en initial snedställning och beskrivs som den Vertikala lasten multiplicerad med snedställningsvinkeln för varje pelare.

$$q_{h,k} = \alpha_{md} \cdot F_v \quad (5.1)$$

$q_{h,k}$ beskriver den horisontella utbredda lasten, α_{md} beskriver snedställningsvinkeln och F_v den vertikala lasten.

Den vertikala lasten, F_v , för byggnaden utgörs i huvudsak av bjälklagens egentyngt samt nyttiga lasten på dessa. Eftersom snedställningslasten utgör en ytlast samt att det endast är en jämförbar last som eftersträvas bortses egentyngheten från de stabiliserande enheterna i här.

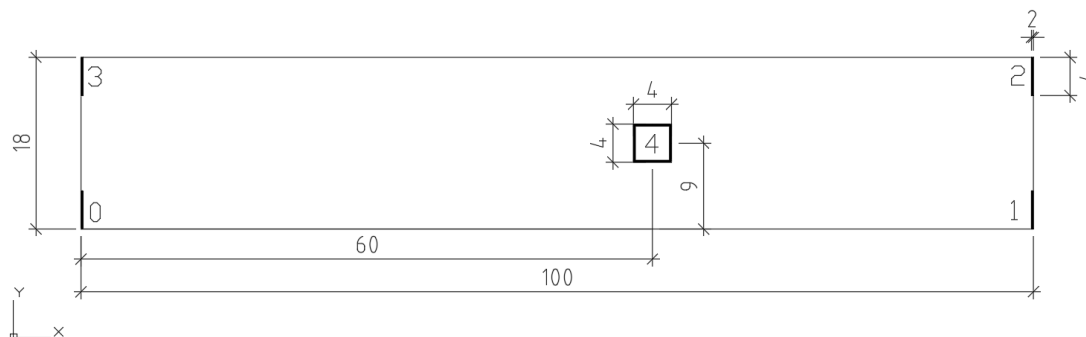
Tabell 5.1: tabell för Tyngder till snedställningslast per kvadratmeter, hämtade från A

egentyngt Bjälklag:	EGT_{BJL}	$7.5kN/m^2$
Nyttig last kontor:	NL_{kontor}	$2.5kN/m^2$

Tabell 5.2: Sammanställning av snedställningsvinklar för bestämmande av horisontal last på grund av snedställning. Värden hämtade från A

Byggnad	Snedställningsvinkel, α_{md}
Hus-ett	0.0047
Telia	0.0044

5.2 Fallstudie Hus-ett



Figur 5.1: Skiss över Hus-ett

Den dimensionerande lasten för Hus-ett räknas fram med hjälp av ekvation A.3 som redovisas i appendix. Säkerhetsklass 3 ger $\gamma_d = 1$ vind som huvudlast ger $\psi_{0,1} = 0.3$. Eftersom det är en ytlast och en linjelast som skall kombineras och föras på byggnadens bjälklagskanter behöver de för Grasshopper och handberäkningarna hanteras genom att ytlasten multipliceras med den byggnadsbredden, det vill säga 18m. samt vindlasten behöver multipliceras med våningshöjden 3m.

Insättning i ekvationen med samverkande egentyngt och nyttiglast ger ett lastvärde på:

$$q_d = 0.0047(1,2 \cdot 7,5 + 1,5 \cdot 2.5) \cdot 18 + 1,5 \cdot 1,755 \cdot 3 = 8,98 \text{ kN/m} \quad (5.2)$$

Det i ekvation 5.2 beräknade värdet används som lastvärde för både Grasshopperskriptet samt vid handberäkningarna. Vid beräkningar i Robot används de karaktäristiska värdena och kombineras som dimensionerande lastvärden i programmet. Detta på grund av att varken Grasshopperskriptet eller handberäkningarna kan hantera en horisontellt utbredd ytlast medans det är möjligt i FEM-programmet Robot. Dock behöver den karaktäristiska utbredda vindlasten multipliceras med våningshöjden 3 meter och läggs efter det in som en linjelast i bjälklagsnivå. Alla karaktäristiska lastvärden till FEM-beräkningar i Robot återfinns i tabell 5.3.

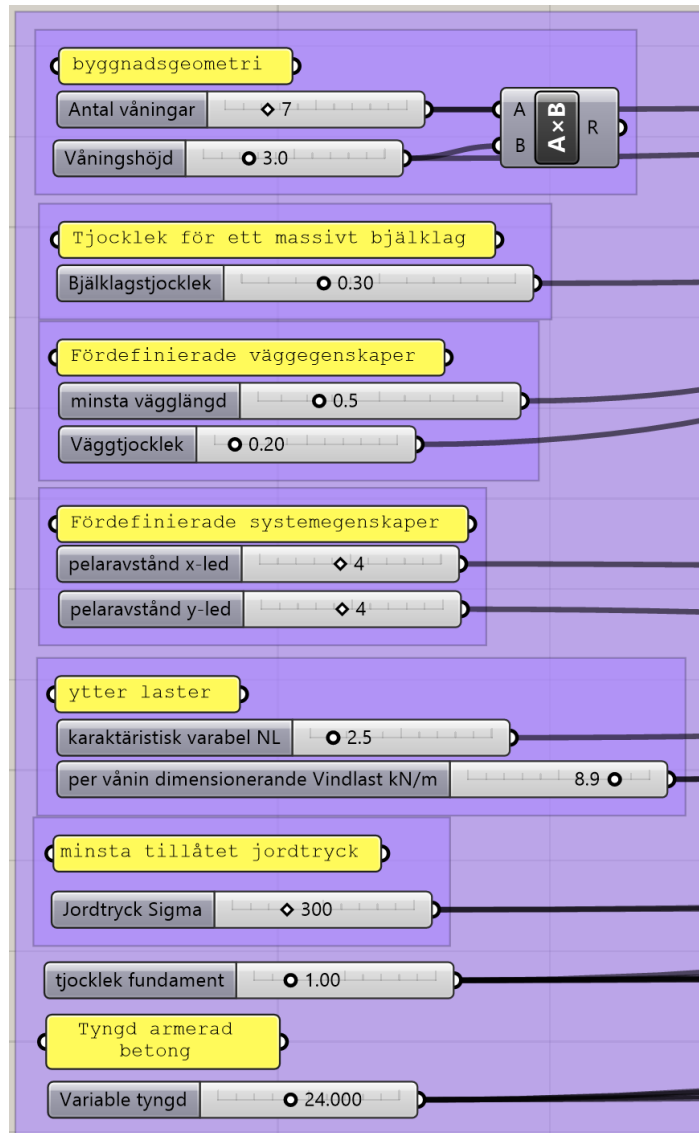
Karaktäristiska indata till Robot är därför

Tabell 5.3: Karaktäristiska lastindata för beräkningar i Robot

Lasttyp	värde	storhet
Vindlast	5.27	kN/m
Snedställningslast	0.047	kN/m^2

5.2.1 Grasshopper

Byggnadens yttergeometri och stabiliserande enheter som visas i figur 5.1 ritas in i Rhino och kopplas till Grasshopper. Sedan ställs flertalet indatan in i Grasshopper, se Figur 5.2. I kapitel 4 ges en mer detaljerad beskrivning på hur skriptet fungerar och i appendix B redovisas resultaten från beräkningarna. Skriptet beräknar stjälpande momenten som verkar på varje stabiliserande enhet. Utifrån detta uppskatts fundamentstorlek och därefter beräknas även enhetens momentkapacitet. Resultatet redovisas i Figur 5.3 .



Figur 5.2: Indata i Grasshopper till Hus-ett

	Stjälpande moment	Stabiliserande moment																								
Vägg	<table border="1"> <thead> <tr><th></th><th>{0}</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>9480.698592</td></tr> <tr><td>1</td><td>4863.450158</td></tr> <tr><td>2</td><td>4863.450158</td></tr> <tr><td>3</td><td>9480.698592</td></tr> <tr><td>4</td><td>46071.7025</td></tr> </tbody> </table>		{0}	0	9480.698592	1	4863.450158	2	4863.450158	3	9480.698592	4	46071.7025	<table border="1"> <thead> <tr><th></th><th>{0;0;0}</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>6795.936</td></tr> <tr><td>1</td><td>6795.936</td></tr> <tr><td>2</td><td>6795.936</td></tr> <tr><td>3</td><td>6795.936</td></tr> <tr><td>4</td><td>14790.308345</td></tr> </tbody> </table>		{0;0;0}	0	6795.936	1	6795.936	2	6795.936	3	6795.936	4	14790.308345
	{0}																									
0	9480.698592																									
1	4863.450158																									
2	4863.450158																									
3	9480.698592																									
4	46071.7025																									
	{0;0;0}																									
0	6795.936																									
1	6795.936																									
2	6795.936																									
3	6795.936																									
4	14790.308345																									
Vägg + Fundament	<table border="1"> <thead> <tr><th></th><th>{0}</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>10270.756808</td></tr> <tr><td>1</td><td>5268.737671</td></tr> <tr><td>2</td><td>5268.737671</td></tr> <tr><td>3</td><td>10270.756808</td></tr> <tr><td>4</td><td>49911.011041</td></tr> </tbody> </table>		{0}	0	10270.756808	1	5268.737671	2	5268.737671	3	10270.756808	4	49911.011041	<table border="1"> <thead> <tr><th></th><th>{0}</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>15420.978934</td></tr> <tr><td>1</td><td>11708.256103</td></tr> <tr><td>2</td><td>11708.256103</td></tr> <tr><td>3</td><td>15420.978934</td></tr> <tr><td>4</td><td>54516.408124</td></tr> </tbody> </table>		{0}	0	15420.978934	1	11708.256103	2	11708.256103	3	15420.978934	4	54516.408124
	{0}																									
0	10270.756808																									
1	5268.737671																									
2	5268.737671																									
3	10270.756808																									
4	49911.011041																									
	{0}																									
0	15420.978934																									
1	11708.256103																									
2	11708.256103																									
3	15420.978934																									
4	54516.408124																									

Figur 5.3: Utdata i Grasshopper till Hus-ett

5.2.2 Handberäkningar

Ekvationerna i detta avsnitt redovisar beräkningarna från handberäkningarna. Endast beräkningarna för enhet 0 redovisas. Övriga beräkningar redovisas i Appendix C. Tydligare förklaring av beräkningsgången redovisades i avsnitt 3.1.

Förbestämda indatan är samma som användes till Grasshopper vilket redovisas i Figur 5.2.

Tröghetsmomenten för enhet noll beräknas i ekvation 5.3 och 5.4.

$$I_{x0} = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{0.2 \cdot 4^3}{12} = 1.07m^4 \quad (5.3)$$

$$I_{y0} = \frac{h \cdot b^3}{12} = \frac{4 \cdot 0.2^3}{12} = 0.003m^4 \quad (5.4)$$

Koordinaterna för enhet 0 mittpunkt i x- och y-led är $x_0 = 0.1m$ respektive

$$y_0 = 2m$$

För att beräkna byggnadens rotationcentrum behövs samtliga stabiliserande enheters tröghetsmoment och tyngdpunktskoordinater. Dessa redovisas i C. Ekvationerna 5.5 och 5.6 beräknar rotationscentrums koordinater.

$$e_x = \frac{\sum(x_i \cdot I_{xi})}{\sum I_{xi}} = \frac{0.1 \cdot 1.07 + 99.9 \cdot 1.07 + 99.9 \cdot 1.07 + 0.1 \cdot 1.07 + 60 \cdot 7.3}{1.07 + 1.07 + 1.07 + 1.07 + 7.3} = 56.3m \quad (5.5)$$

$$e_y = \frac{\sum(y_i \cdot I_{yi})}{\sum I_{yi}} = \frac{2 \cdot 0.003 + 2 \cdot 0.003 + 16 \cdot 0.003 + 16 \cdot 0.003 + 9 \cdot 7.3}{0.003 + 0.003 + 0.003 + 0.003 + 7.3} = 9m \quad (5.6)$$

Avståndet mellan Enhet 0 och byggnadens rotationscentrum beräknas i ekvation 5.7 och 5.8 nedan.

$$r_{x0} = e_x - x_0 = 56.3 - 0.1 = 56.2m \quad (5.7)$$

$$r_{y0} = e_y - y_0 = 9 - 2 = 7m \quad (5.8)$$

Tabell 5.4 nedan redovisar beräkningen av nämnaren i horisontallastfördelnings ekvationen 5.9.

Tabell 5.4: Beräknar $\sum r_i^2 \cdot I_i$

$\sum r_i^2 \cdot I_i$					
	r_x [m]	r_y [m]	I_{xi} [m^4]	I_{yi} [m^4]	$r_i^2 * I_i$ [m^6]
0	56.2	7	1.07	0.003	3372
1	-43.6	7	1.07	0.003	2026
2	-43.6	-7	1.07	0.003	2026
3	56.2	-7	1.07	0.003	3372
4	-3.7	0	7.34	7.34	99
Summa					10894

Slutligen fördelas den dimensionerande horisontella lasten mellan enheterna. Detta görs i ekvation 5.9 och 5.10.

$$Q_{xi} = q_y \cdot L \cdot \left(e_x - \frac{L}{2}\right) \cdot \frac{r_{yi} \cdot I_{yi}}{\sum r_i^2 \cdot I_i} = 8.9 \cdot 100 \cdot \left(56 - \frac{100}{2}\right) \cdot \frac{7 \cdot 0.003}{10894} = 0.01 kN \quad (5.9)$$

$$Q_{yi} = q_y \cdot L \cdot \left(\frac{I_{yi}}{\sum I_x} + \left(e_x - \frac{L}{2}\right) \frac{r_{yi} \cdot I_{yi}}{\sum r_i^2 \cdot I_y}\right) = \quad (5.10)$$

$$8.9 \cdot 100 \cdot \left(\frac{0.003}{11.6} + \left(56.3 - \frac{100}{2}\right) \frac{7 \cdot 0.003}{10894}\right) = 112.8 kN$$

5.2.2.1 Fundamentkontroll

I handberäkningarna genomförs en kontrollberäkning på att det framtagna fundamentet i Grasshopper klarar de laster som det utsätts för. Fundamentdimensionerna är framtagna för att ge det minsta möjliga fundamentet. Detta innebär att det mothållande momentet ska vara lika med det stjälpande.

Nedan redovisas kontrollberäkningarna för enhet 0. Resultatet blev att bredden b och längden, L blev 2.2 respektive 11.25 meter. Tjockleken var angiven till 1 meter vilket ger en volym på $25 m^3$ och en tyngd på 594 kN.

Väggens basarea beräknas i ekvation 5.11.

$$A_{vagg} = L_{vagg} \cdot b_{vagg} = 4 \cdot 0.2 = 0.8 m^2 \quad (5.11)$$

Höjden för enheten är 21 m och betongens tyngd är satt till 24 kN/m alltså är väggens tyngd blir 403 kN.

För att veta hur stor del av den nyttiga lasten och bjälklagets egentyngd som förs ner genom enheten måste enhetens influensarea beräknas. Då pelaravstånden är 4 m så antas influensarean vara väggens längd adderat med 4 och detsamma för bredden. Dock är enheterna 0 till 4 placerade i hörn vilket gör att dessa får en mindre influensarea. Detta tas inte hänsyn till när influensarean beräknas fram i Grasshopper. Enhet nolls influensarea beräknas i ekvation 5.12. I ekvationen skrivs pelaravståndet som a .

$$Influensarea = \left(L_{vagg} + \frac{a}{2}\right) \cdot \left(b_{vagg} + \frac{a}{2}\right) = \left(4 + \frac{4}{2}\right) \cdot \left(0.2 + \frac{4}{2}\right) = 13.2 m^2 \quad (5.12)$$

Nyttiga lasten och bjälklagestyngd för samtliga våningar utgör tillsammans med väggens och fundamentets tyngd den totala vertikala lasten. Med säkerhetsfaktorer på 1.2 för egentyngd och 1.5 för nyttiga lasten så blev den vertikala tyngden 2342 kN. Stjälpande momentet i underkant av fundamentet beräknades till 10265.

Hävarmen beräknas till 4.4 m. Avståndet mellan hävarmens verkningspunkt och ytterkanten på fundamentet utgör sträckan s . I detta fall blev beräknas s till 1.2 m. Beräkningen av den trykta arean kan därefter beräknas, Detta redovisas i ekvation 5.13.

$$A_{tryckt} = 2s \cdot b = 2 \cdot 1.2 \cdot 2.2 = 5.28m^2 \quad (5.13)$$

Den trykta arean tillsammans med ett jordtryckskapacitet på $300 \text{ kN}/m^2$ ger en maximalt mothållande kraften på 1641 kN.

Som kontroll beräknas den utnyttjandegraden genom att den vertikala lasten divideras med lastkapaciteten. För enhet 0 blev kvoten 1.4 vilket innebär att lasten överskrider kapaciteten.

5.2.2.2 Moment

I denna del beräknas det stjälpande och det stabiliserande momentet. Det beräknas för både vägg utan fundament och för vägg när den samverkar med fundament.

Utifrån horisontella lasten så kan det stjälpande momentet beräknas. Det görs genom att addera ihop horisontella lasten från samtliga bjälklag multiplicerat med dess avstånd till grunden. I ekvation 5.33 beräknas hur lasten i y riktningen Q_y räknas om till ett moment för enhet 0.

$$M_{yi} = Q_y \cdot \sum \text{vaningsshjd} = 112.8 \cdot (3+6+9+12+15+18+21) = 9475kN \quad (5.14)$$

Detta är momentet vid underkanten av väggen.

Det motsvarande stabiliserande momentet beräknades genom att multiplicera den vertikala vikten som förs ner via enheten multiplicerat med den maximala hävarmen, vilket är halva vägg längden.

$$M_{y, \text{stabiliserande}} = F_v \cdot L/2 = 1630 \cdot 4/2 = 3260kN \quad (5.15)$$

Detta resultat visar på att enbart väggen inte klarar det stjälpande momentet.

Det stjälpande momentet för väggen med fundament beräknas enligt ekvation 5.34.

$$M_{yi} = Q_y \cdot \sum \text{våningsshjd} = 112.8 * (4 + 7 + 10 + 13 + 16 + 19 + 22) = 10265kN \quad (5.16)$$

Det motsvarande stabiliserande momentet beräknades

$$M_{y,\text{stabiliserande}} = F_v \cdot h\text{varm} = 2342 \cdot 4.4 = 10305kN \quad (5.17)$$

I detta fall klarar väggen tillsammans med fundamentet precis att hålla emot det stjälpande momentet. Som tidigare nämnt så är fundamentet dimensionerat för att precis klara momentet som enheten utsätts för.

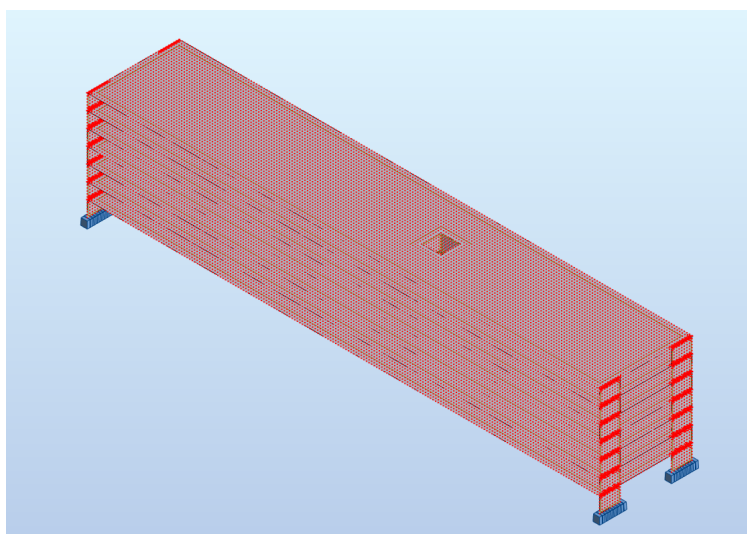
5.2.3 FEM

Indata och Modellbyggnad:

Hus-ett har en yttergeometri enligt Figur 5.1. Med sina sju våningsplan med en våningshöjd på tre meter mäter byggnaden totalt 21m. De stabiliserande enheterna består av fyra rektangulära skjuvväggar och ett hisschakt enligt figur 5.1. Samtliga horisontella enheter är gjutna av betong c37/40 med en tjocklek på 200mm. Bjälklagen är gjutna i samma betongklass med en tjocklek på 300mm.

Linjelasten och snedställningslasten som verkar på varje våningsplan är enligt tabell 5.8 $q_{k,\text{vind0}} = 5.27kN/m$ samt $q_{k,\text{sned}} = 0.047kN/m^2$

Vindlasten läggs in som en linjelast verkandes på alla bjälklagskanter i y-led. Snedställningslasten läggs in som en horisontell ytlast verkandes över alla bjälklagsytor i samma riktning som vindlasten varefter hela modellen meshas med element i storleken $0,5 \cdot 0,5 m^2$, se Figur 5.4.



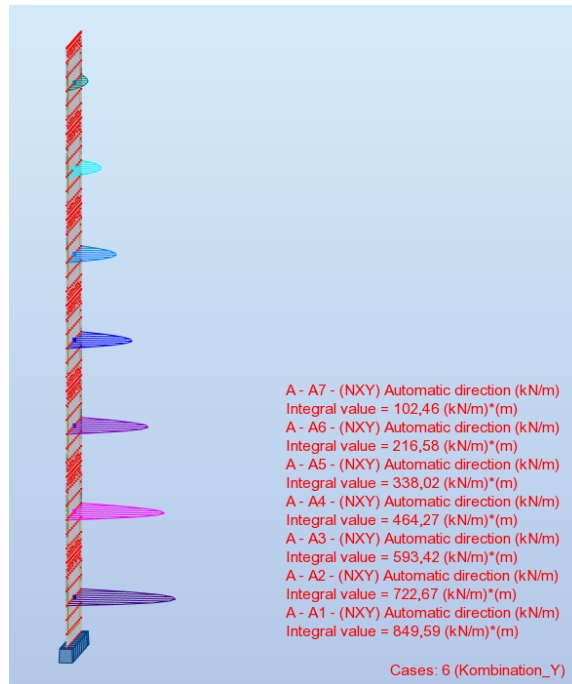
Figur 5.4: Meshad FEM-modell av Hus-ett

Analys:

Från FEM-beräkningarna kan alla tvärkrafter och upplagskrafter i systemet läsas ut. I tabell D.1 finns alla Tvärkrafter samt tillskottet av horistonella laster Q_y per våning sammanställda. I tabell 5.6 finns momentfördelningen för varje enhet redovisad, i tabell D.7 finns momentfördelningen mellan enheterna. Momentet beräknas med ekvation 3.15 och redovisas för stabiliserande enhet E0 med ekvation 3.15 nedan. Q_x beräknas med ekvation 3.16. Figur 5.5 visar tvärkraftsfördelningen i enhet E0.

Q_x och Q_y beräknas genom att tvärkraften från den överliggande våningen subtraheras från underliggande vånings enligt 3.16. Ett medelvärde för Q_y bestäms för att kunna jämföra beräkningsresultat med Grasshopperskriptet och handberäkningarna. Resultaten visas i tabell 5.5 nedan.

Resultatet av beräkningar för Q_x , Q_y samt Momentfördelning i varje enhet syns i tabell 5.5 och 5.6 samt 5.7 För utförligare beräkningar och ytterligare beräknade värden se appendix D.



Figur 5.5: Tvärkraft utläst ur Robot med hjälp av Panel Cuts

Tabell 5.5: Q_y på bjälklagsnivå på alla stabiliserande enheter (E) för vind längs långsidan. Hämtad från Appendix D tabell D.3

Vån.	H [m]	E0 [kN]	E1 [kN]	E2 [kN]	E3 [kN]	E4 [kN]
7	21	102	54	54	102	588
6	18	114	62	62	114	547
5	15	121	70	70	122	517
4	12	126	76	76	127	494
3	9	129	79	80	129	481
2	6	129	79	78	128	486
1	3	127	75	69	121	499
Medel		121	71	70	120	516

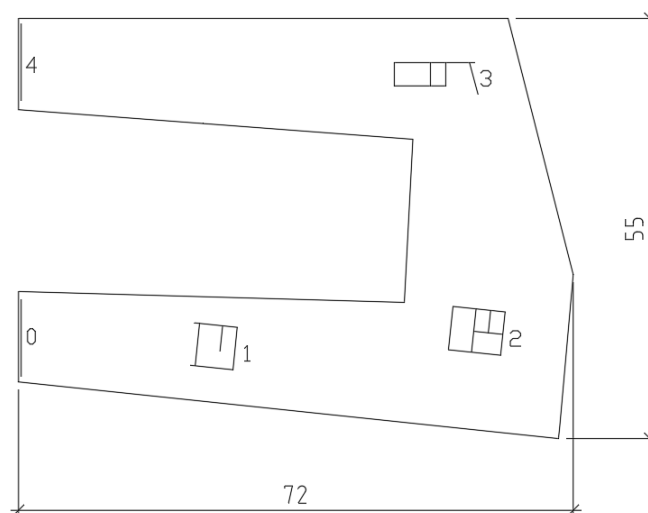
Tabell 5.6: Moment, M_x , i bjälklagsnivå på alla stabiliserande enheter (E) för vind längs långsidan (y-led) med med höjd beräknad från underkant stabiliserande enhet. Hämtad från Appendix D tabell D.6

Vån.	H [m]	E0 [kNm]	E1 [kNm]	E2 [kNm]	E3 [kNm]	E4 [kNm]
7	21	0	0	0	0	0
6	18	307	163	162	307	1763
5	15	957	510	510	957	5166
4	12	1971	1067	1067	1972	10118
3	9	3364	1852	1854	3366	16554
2	6	5144	2876	2880	5148	24433
1	3	7312	4137	4139	7315	33771
0	0	9861	5622	5604	9844	44606

Tabell 5.7: Moment, och horisontallast som verkar på fundament fördelat per enhet med vind i Y-led. Tabellvärden från D.6 hämtade i appendix D

Enhet [m]	Moment [kNm]	Q_y [kN/vån]	Momentandel [%]
0	9861	121	13
1	5622	71	7
2	5904	70	7
3	9844	120	13
4	44606	516	59
TOTAL	75538	898	100

5.3 Fallstudie Teliabyggnaden



Figur 5.6: Skiss över Teliabyggnaden

Den dimensionerande lasten för Teliabyggnaden räknas fram med hjälp av ekvation A.3. Säkerhetsklass 3 ger $\gamma_d = 1$ vind som huvudlast ger $\psi_{0,1} = 0.3$. Eftersom det är en ytlast och en linjelast som skall kombineras och föras på byggnadens bjälklagskanter behöver de för Grasshopper och handberäkningarna hanteras genom att ytlasten multipliceras med byggnadsbredden 18m samt vindlasten behöver multipliceras med våningshöjden 3m.

Insättning i ekvationen med samverkande egentyngd och nyttiglast samt reduktion av dessa enligt ekvation A.5 ger ett lastvärde på:

$$q_d = 0.0047(1.2 \cdot 7.5 + 1.5 \cdot 2.5) \cdot 18 + 1.5 \cdot 1.755 \cdot 3 = 9.7 \text{ kN/m} \quad (5.18)$$

Det i ekvation 5.18 beräknade värdet används som lastvärde för både Grasshopperskriptet samt vid handberäkningarna. Vid beräkningar i Robot används de karaktäristiska värdena och kombineras som dimensionerande lastvärden i programmet. Detta på grund av att varken Grasshopperskriptet eller handberäkningarna kan hantera en horisontellt utbredd last medans det är möjligt i FEM-programmet Robot. Dock behöver den karaktäristiska utbredda vindlasten multipliceras med våningshöjden 3 meter och läggs efter det in som en linjelast i bjälklagsni-

vå. Alla karaktäristiska lastvärden till FEM-beräkningar i Robot återfinns i tabell 5.8.

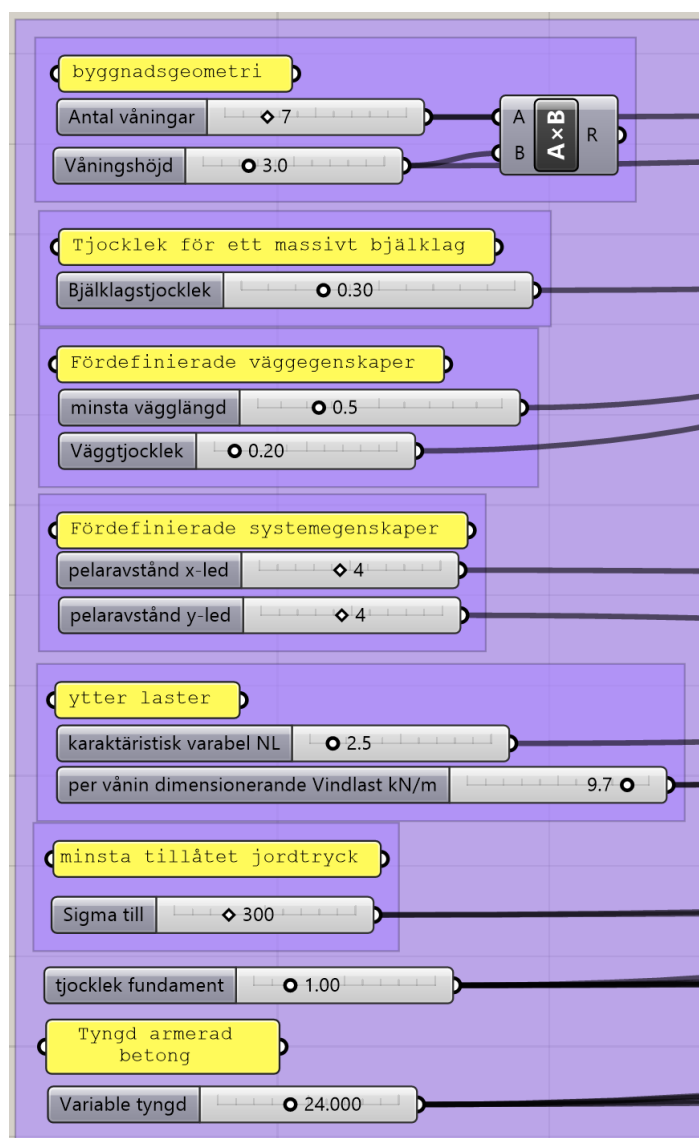
Karaktäristiska indata till Robot är därför

Tabell 5.8: Karaktäristiska lastindata för beräkningar i Robot

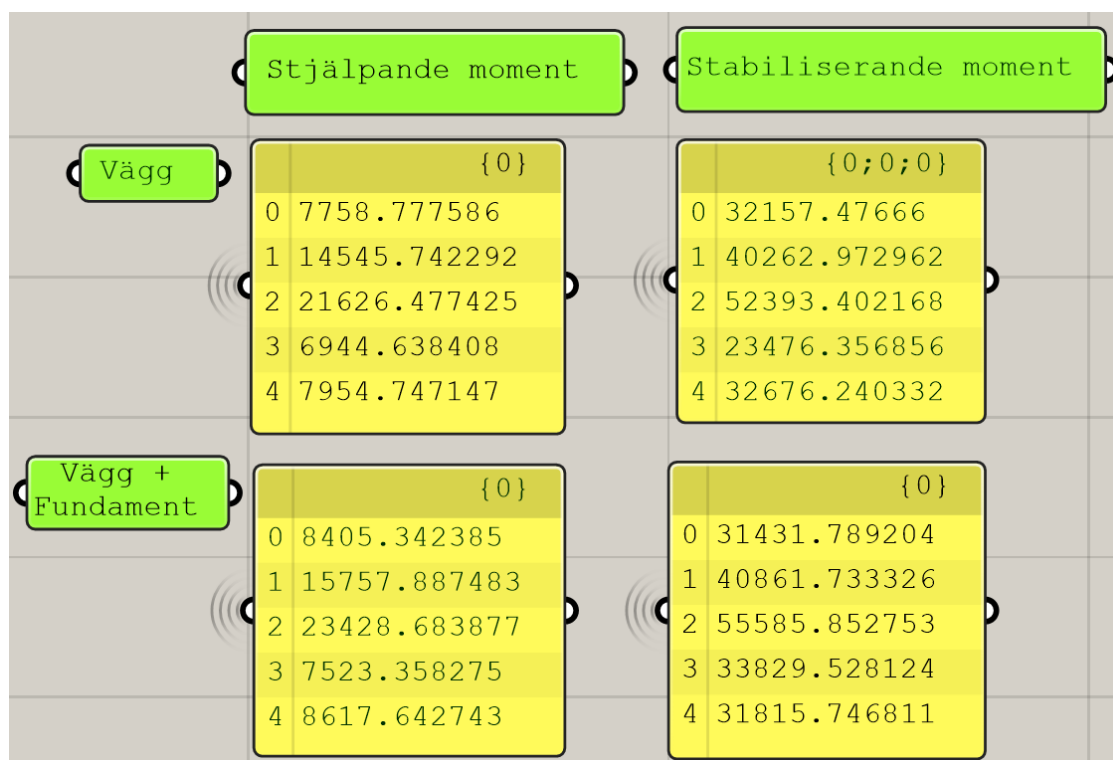
Lasttyp	värde	storhet
Vindlast	5.27	kN/m
Snedställningslast	0.047	kN/m^2

5.3.1 Grasshopper

Fallstudieberäkningarna för Telia byggnaden utförs på samma sätt som hör Hus-ett. Yttergeometrin och fasta enheter som visas i Figur 5.6 ritas i Rhino 3D och kopplas till Grasshopper. Den indatan som används redovisas i Figur 5.7 och de resultat som beräknas fram redovisas i Figur 5.8. Appendix B redovisar samtliga beräkningar.



Figur 5.7: Indata i Grasshopper till Teliabyggnaden



Figur 5.8: Utdata i Grasshopper till Teliabyggnaden

5.3.2 Handberäkningar

Handberäkningar för Teliabyggnaden görs på som för hus-ett. Nedan redovisas handberäkningarna för enhet 0. Indatan är samma som användes i Grasshopper skriptet som redovisades i Figur 5.8.

Tröghetsmomenten för enhet noll beräknas i ekvation 5.19 och 5.20.

$$I_{x0} = \frac{b \cdot h^3}{12} = \frac{0.2 \cdot 10^3}{12} = 16.6 \quad (5.19)$$

$$I_{y0} = \frac{h \cdot b^3}{12} = \frac{10 \cdot 0.2^3}{12} = 0.00667 \quad (5.20)$$

Avståndet mellan byggnadens mittpunkt och enhet nolls mittpunkt i x- och y-led beräknas med ekvation 5.21 respektive 5.22.

$$x_0 = 0.1m \quad (5.21)$$

$$y_0 = 5m \quad (5.22)$$

Rotationscentrums koordinater beräknas i ekvation 5.23 och 5.24

$$e_x = \frac{\sum(x_i \cdot I_{xi})}{\sum I_{xi}} = \frac{0.4 \cdot 17 + 25.4 \cdot 30 + 59.6 \cdot 40 + 54.1 \cdot 13 + 0.4 \cdot 18}{17 + 30 + 40 + 13 + 18} = 33m \quad (5.23)$$

$$e_y = \frac{\sum(y_i \cdot I_{yi})}{\sum I_{yi}} = \frac{13.1 \cdot 0.01 + 9.9 \cdot 25 + 11.9 \cdot 50 + 47.6 \cdot 86 + 49.1 \cdot 0.01}{0.01 + 25 + 50 + 86 + 0.01} = 31m \quad (5.24)$$

Avståndet mellan enhet 0 och byggnadens rotationscentrum beräknas i ekvation 5.25 och 5.26 nedan.

$$r_{x0} = e_x - x_0 = 56.3 - 0.1 = 56.2m \quad (5.25)$$

$$r_{y0} = e_y - y_0 = 9 - 2 = 7m \quad (5.26)$$

För att kunna göra lastfördelningen behövs även summan av enheternas avstånd till rotationcentrum i kvadrat multipliceras med enheternas tröghetsmoment. Detta redovisas i tabell 5.9 nedan.

Tabell 5.9: Beräknar $\sum r_i^2 \cdot I_i$

ekvation $\sum r_i^2 \cdot I_i$					
	$r_x [m]$	$r_y [m]$	$I_{xi} [m^4]$	$I_{yi} [m^4]$	$r_i^2 * I_i [m^6]$
0	56.2	7	1.07	0.003	3372
1	-43.6	7	1.07	0.003	2026
2	-43.6	-7	1.07	0.003	2026
3	56.2	-7	1.07	0.003	3372
4	-3.7	0	7.34	7.34	99
Summa					10894

Slutligen fördelas den dimensionerande horisontella lasten mellan enheterna. Detta görs enligt ekvation 5.27 och 5.28.

$$Q_{xi} = q_y \cdot L \cdot \left(e_x - \frac{L}{2} \right) \cdot \frac{r_{yi} \cdot I_{yi}}{\sum r_i^2 \cdot I_i} = 8.9 \cdot 100 \cdot \left(56 - \frac{100}{2} \right) \cdot \frac{7 \cdot 0.003}{10894} = 0.01 kN \quad (5.27)$$

$$Q_{yi} = q_y \cdot L \cdot \left(\frac{I_{yi}}{\sum I_x} + \left(e_x - \frac{L}{2} \right) \frac{r_{yi} \cdot I_{yi}}{\sum r_i^2 \cdot I_y} \right) = \quad (5.28)$$

$$8.9 \cdot 100 \cdot \left(\frac{0.003}{11.6} + \left(56.3 - \frac{100}{2} \right) \frac{7 \cdot 0.003}{10894} \right) = 112.8 kN$$

5.3.2.1 Fundamentkontroll

På samma sätt som för Hus-ett kontrolleras det framtagna fundamentet. Fundamentdimensionerna redovisas i tabell C.27

Nedan redovisas kontrollberäkningarna för enhet 0 i Teliabyggnaden. Resultatet blev att bredden, b och längden L blev 2.2 respektive 13.10. Tjockleken var angiven till 1 vilket ger en volym på $25 m^3$ och en tyngd på 696 kN.

Väggens basarea beräknas i ekvation 5.29.

$$A_{vagg} = L_{vagg} \cdot b_{vagg} = 10 \cdot 0.2 = 2m^2 \quad (5.29)$$

Höjden för enheten är 21m och betongens tyngd är satt till 24 kN/m vilket gör väggens tyngd blir 1040 kN.

Då enheten står i ett hörn blir influensarean ungefär enligt beräkningen i ekvation ??

$$Influensarea = (L_{vagg}) \cdot \left(b_{vagg} + \frac{a}{2} \right) = (10) \cdot \left(0.2 + \frac{4}{2} \right) = 20m^2 \quad (5.30)$$

Nyttiga lasten och bjälklagestyngd för samtliga våningar inom enhetens influensarea och väggens och fundamentets tyngd utgör den totala vertikala lasten. Vertikala tyngden beräknades till 3810 kN. Stjälpande momentet i underkant av fundamentet beräknades till 8336 kNm.

Hävarmen beräknades till 2.2 m. Avståndet mellan hävarmen och ytterkanten på fundamentet utgör sträckan s som därmed blev då 4.4 m. Beräkningen av trycktaarea redovisas i ekvation 5.31

$$A_{tryckt} = 2s \cdot b = 2 \cdot 4.4 \cdot 2.2 = 19m^2 \quad (5.31)$$

Trycktaarean tillsammans med ett jordtryck på 300 kN/m^2 beräknas lastkapaciteten till 5796 kN.

Som kontroll beräknas den utnyttjande graden genom vertikala lasten divideras med lastkapaciteten. För enhet 0 blev kvoten 0.7 vilket innebär att enheten klarar lasten.

5.3.2.2 Moment

I denna del beräknas det stjälpande och det stabiliserande momentet. Det beräknas för både vägg utan fundament och för vägg med tillhörande fundament.

Utifrån horisontella lasten så kan det stjälpande momentet beräknas. Det görs genom att addera ihop horisontella lasten från samtliga bjälklag multiplicerat med dess avstånd till grunden. I ekvation 5.33 beräknas hur lasten i y riktningen Q_y räknas om till ett moment för enhet 0.

$$M_{yi} = Q_y \cdot \sum \text{vaningsshjd} = 91.6 \cdot (3+6+9+12+15+18+21) = 7694.4 \text{ kN} \quad (5.32)$$

Detta är momentet vid underkanten av väggen.

Det motsvarande stabiliserande momentet beräknades genom att multiplicera den vertikala lasten från väggen som förs ner via enheten multiplicerat med den maximala hävarmen, vilket är halva vägglängden.

$$M_{y,\text{stabiliserande}} = F_v \cdot L/2 = 2975 \cdot 10/2 = 14874 \text{ kN} \quad (5.33)$$

Detta resultat visar på att väggen själv klarar det stjälpande momentet. Det stjälpande momentet för väggen med fundament beräknas enligt ekvation 5.34.

$$M_{yi} = Q_y \cdot \sum \text{vaningsshjd} = 91.6 \cdot (4+7+10+13+16+19+22) = 8336 \text{ kN} \quad (5.34)$$

Det motsvarande stabiliserande momentet beräknades

$$M_{y,\text{stabiliserande}} = F_v \cdot h_{\text{warm}} = 3810 \cdot 2.2 = 8382 \text{ kN} \quad (5.35)$$

I detta fall klarar väggen tillsammans med fundamentet precis att hålla emot det stjälpande momentet. Vilket även resultatet för Hus-ett visade.

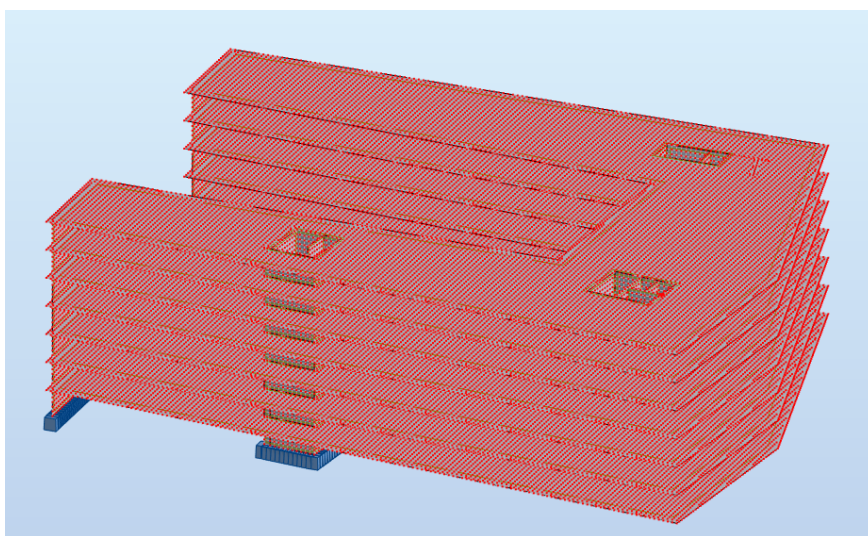
5.3.3 FEM

Indata och Modellbyggnad:

Teliarhuset har en yttergeometri enligt 5.6. Med sina sju våningsplan med en våningshöjd på tre meter mäter även teliabyggnaden 21m. De stabiliserande enheterna består av två rektangulära skjuvväggar och tre hisschakt (Figur 5.9). Samtliga horisontella enheter är gjutna av betong c37/40 med en tjocklek på 200mm. Bjälklagen är gjutna i samma betongklass med en tjocklek på 300mm.

Linjelasten och snedställningslasten som verkar på varje våningsplan är enligt tabell 5.8 $q_{k,vind0} = 5.27kN/m$ samt $q_{k,sned} = 0.047kN/m^2$

Vindlasten läggs in som en linjelast verkandes på alla bjälklagskanter i y-led. Snedställningslasten läggs in som en horisontell ytlast verkandes över alla bjälklagsytor i samma riktning som vindlasten varefter hela modellen meshas med element i storleken $0,5 \cdot 0,5m^2$.



Figur 5.9: Teliabyggnaden modellerad och Meshad

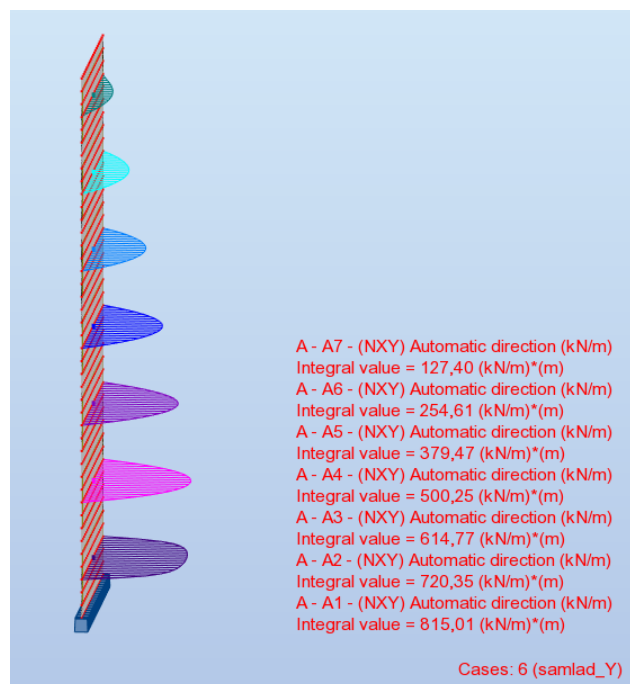
Analys:

Från FEM-beräkningarna kan alla tvärkrafter och upplagskrafter i systemet läsas ut. Q_x beräknas med ekvation 3.16. Figur 5.10 visar tvärkraftsfördelningen i enhet E0. I tabell 5.10 finns alla horisontella laster Q_y per våning per enhet sammanställda. I tabell 5.11 finns momentfördelningen för varje enhet redovisad, i tabell 5.12 finns momentfördelningen mellan enheterna. Momentet beräknas med ekvation 3.15 och

redovisas för stabiliserande enhet E0 med ekvation 3.15 nedan.

Q_x och Q_y beräknas genom att tvärkraften från den överliggande våning-
en subtraheras från underliggande vånings enligt 3.16. Ett medelvärde
för Q_y bestäms för att kunna jämföra beräkningsresultat med Grass-
hopperskriptet och handberäkningarna. Resultaten visas i tabell 5.10
nedan.

Resultatet av beräkningar för Q_x , Q_y samt Momentfördelning i varje enhet
syns i tabell 5.10 och 5.11 samt 5.12 För utförligare beräkningar och
ytterligare beräknade värden se appendix D.



Figur 5.10: Tvärkraftsfördelning i Enhet 0 representerat med funktionen
Panel cuts i Robot

Tabell 5.10: Q_y på bjälklagsnivå på alla stabiliserande enheter (E) för vind längs långsidan. Hämtad från Appendix D tabell D.11

Vån.	H [m]	E0 [kN]	E1 [kN]	E2 [kN]	E3 [kN]	E4 [kN]
7	21	127	179	300	80	61
6	18	127	186	279	98	52
5	15	125	197	272	102	44
4	12	121	212	266	103	36
3	9	115	233	252	107	28
2	6	106	262	227	116	22
1	3	95	295	208	115	17
Medel		116	224	258	103	37

Tabell 5.11: Moment, M_x , i bjälklagsnivå på alla stabiliserande enheter (E) för vind längs långsidan (y-led) med med höjd beräknad från underkant stabiliserande enhet. Hämtad från Appendix D tabell D.14

Vån.	H [m]	E0 [kNm]	E1 [kNm]	E2 [kNm]	E3 [kNm]	E4 [kNm]
7	21	0	0	0	0	0
6	18	382	536	899	241	182
5	15	1146	1628	2637	777	520
4	12	2284	3313	5189	1621	989
3	9	3785	5635	8541	2772	1565
2	6	5630	8656	12650	4246	2227
1	3	7791	12464	17441	6068	2953
0	0	10236	17159	22855	8236	3729

Tabell 5.12: Momment, och horisontallast som verkar på fundament fördelat per enhet med vind i Y-led. Tabellvärden från D.14 hämtade i appendix D

Enhet [m]	Moment [kNm]	Q _y [kN/vån]	Momentandel [%]
0	10236	116	16
1	17159	224	28
2	22855	258	37
3	8236	103	13
4	3729	37	6
TOTAL	62215	738	100

6 Resultat

6.1 Grasshopperskriptet

Automatiseringen av konstruktionsberäkningarna har visat sig gå bra. Det finns stora möjligheter till ytterligare automatiseringar. Dock är själva programmerandet en tidskrävande process.

Den stora styrkan i Grasshopperskriptet ligger i dess användarvänlighet. Med några få klick och tangenttryck kan snabbt en överskådlig horisontalkrafts- och momentfördelning ses. Dessa värden uppdateras momentant när element flyttas runt. Det visualiseras tydligt genom att de uppskattade fundamentens storlek förändras i Rhino, vilket sparar väldigt mycket tid gentemot att flytta ett element och räkna om det. Resultatet av automatiseringen beskrivs detaljerat i kapitel 4 där även skriptets begränsningar omnämns.

I skriptets nuvarande utförande är användningsområdet begränsat då det endast räknar fram den horisontella lastfördelningen på de stabiliserande element som finns i modellen samt de genererade. Skriptets pålitlighet är högre för byggnader med mer simpelt utförande än en mer avancerad struktur vilket syns i fallstudieresultaten nedan. Detta är nödvändigtvis inte en brist i Grasshoppermodelleringen utan kanske snarare en brist i beräkningsmodellen för rotationscentrum.

6.2 Fallstudie Hus-ett

I tabellerna nedan redovisas och jämförs resultaten för Hus-ett från Grasshopper, handberäkningar och FEM. Resultaten som redovisas är horisontallasten Q_y som redovisas i Tabell 6.1. Momenten som beror av den horisontella lasten redovisas i tabell 6.2. Momentfördelningen mel-

lan enheterna visas i Tabell 6.3. Det syns tydligt att alla tre modeller följer varandra utan några större skillnader i värden. Speciellt tydligt blir det i Tabell 6.3 där momentfördelningen mellan alla enheter är nästan identisk. skiljer bara någon enstaka procent samt totalsumman för de stjälpande momenten i Tabell 6.2 och de horisontala lasterna över alla enheter enligt tabell 6.1 stämmer väl överens. Detta visar på att skriptet fungerar väl för enklare byggnader.

Tabell 6.1: Jämförelse mellan de olika beräkningssätten av det stjälpande momentet i botten av varje stabiliserande enhet

Horisontallast, Q_y [kN]			
Enhet	Grasshopper	Handberäkningar	Robot
0	113	113	121
1	58	58	71
2	58	58	70
3	113	113	120
4	548	549	516
Summa	890	890	898

Tabell 6.2: Jämförelse mellan de olika beräkningssätten av det stjälpande momentet i botten av varje stabiliserande enhet

Stjälpande moment, M_x [kNm]			
Enhet	Grasshopper	Handberäkningar	Robot
0	9481	9475	9861
1	4863	4856	5622
2	4863	4856	5604
3	9481	9475	9844
4	46072	46099	44606
Summa	74760	74760	75538

Tabell 6.3: Jämförelse mellan de olika beräkningssätten av momentfördelningen av det stjälpande momentet mellan enheterna.

Fördelning av stjälpande moment, M_x [%]			
Enhet	Grasshopper	Handberäkningar	Robot
0	13	13	13
1	07	06	07
2	07	06	07
3	13	13	13
4	62	62	59
Summa	100	100	100

6.3 Fallstudie Teliabyggnaden

I tabellerna nedan redovisas och jämförs resultaten för teliabyggnaden från Grasshopper, handberäkningar och FEM. Resultaten som redovisas är horisontallasten Q_y som redovisas i Tabell 6.4. Momenten som beror av den horisontella lasten redovisas i tabell 6.4. Momentfördelningen mellan enheterna visas i Tabell 6.6. inte heller här skiljer sig resultatet åt särskilt mycket. Det som skiljer sig mest syns Tabell 6.3 där momentfördelningen mellan alla enheter skiljer lite mellan de olika beräkningarna. Grasshopper och handberäkningarna följs åt bra medans fem tillskriver en mindre andel av lasten i enhet E4 joch fördelar den på enhet E0 och E1 istället. Dock skiljer bara några några procent av totalsumman för de stjälpande momenten i Tabell 6.2 och de horisontala lasterna över alla enheter enligt tabell 6.1. stämmer väl överens. Detta visar på att skriptet fungerar mindre bra men ändå tillfredställande även för mer avancerade byggnader.

Tabell 6.4: Jämförelse mellan de olika beräkningssätten av det stälpan-
de momentet i botten av varje stabiliserande enhet

Horisontallast, Q_y [kN]			
Enhet	Grasshopper	Handberäkningar	Robot
0	92	92	116
1	173	173	224
2	257	259	258
3	83	83	103
4	95	94	37
Summa	700	700	738

Tabell 6.5: Jämförelse mellan de olika beräkningssätten av det stälpan-
de momentet i botten av varje stabiliserande enhet

Stälpande moment, M_x [kNm]			
Enhet	Grasshopper	Handberäkningar	Robot
0	7759	7695	10236
1	14546	14508	17159
2	21626	21750	22855
3	6945	6984	8236
4	7955	7892	3729
Summa	58830	58829	62214

Tabell 6.6: Jämförelse mellan de olika beräkningssätten av momentför-
delningen av det stälpande momentet mellan enheterna.

Fördelning av stälpande moment, M_x [%]			
Enhet	Grasshopper	Handberäkningar	Robot
E0	13	13	16
E1	25	25	28
E2	37	37	37
E3	12	12	13
E4	14	13	06
Summa	100	100	100

7 Slutsats och diskussion

7.1 Slutsats

Detta examensarbete har visat på att automatisering av konstruktionsberäkningar vid tidiga skeden är möjliga. Det finns stora möjligheter att kunna utforma och anpassa skripten efter egen önskan. Grasshopper-skriptet är ett exempel på vad som är möjligt att genomföra. Med mer tid skulle fler bärandesystem kunna inarbetas och inkopereras i skriptet så att det kan ge förslag på flera olika stabiliseringstyper då det är väldigt smidigt att göra parallella beräkningar i Grasshopper.

Resultaten från grasshopperskriptet och handberäkningarna var relativt lika fram till dess att fundamenten skulle dimensioneras vilket visade på att skriptets första del fungerar som det är tänkt men att fundamentdimensioneringsdelen kräver mer arbete. Att även FEM resultaten stämde bra överens med grasshopper resultaten tyder på att beräkningsmetoden som skriptet baserats på ger en bra bild av verkligheten. Det styrker alltså trovärdigheten i resultatet från skriptet. Resultaten från fallstudierna visar på att Grasshopperskriptet fungerar i dagsläget tillfredställande för enklare byggnader och kan ge ett någorlunda bra resultat för mer avancerade strukturer. Som skriptet är utformat kräves det att användaren har stor förståelse/erfarenhet för konstruktion. Detta krävs både för att veta vad för indata som krävs samt för att kunna avgöra om resultatet är ett vettigt. I övrigt är det ett lätthanterligt verktyg som snabbt tar fram ett resultat.

Modellen för RC är lite för enkel vid "udda geometrier i form av t.ex uformade byggnader pga deformationen i bjälklagen börjar bli påtaglig då.

7.2 Diskussion

För både Hus-ett och Telia byggnaden stämmer moment resultaten för Grasshopper och handberäkningarna bra överens. Detta tyder på att beräkningarna som görs i Grasshopper är korrekta. Resultaten för Hus-ett från FEM stämmer bra överens med Grasshopper resultatet medan för Telia byggnaden skiljer sig resultaten en del. Att resultaten inte stämmer bra överens visar på att beräkningsmetoden tillsammans med de antaganden som görs inte stämmer bra med andra resultat.

Handberäkningar av rotationen i plan ger stora skillnader jmf med GH pga tp beräknat för hand=svårt att få rätt. små variationer(40cm) minskar skillnanden mellan vindens moment och mothållande moment från 1000kNm till 0. Detta utgör en felkälla vid beräkningar av TP och Ix,Iy och genererar följdfel på rx ry och är återkommande genom alla beräkningarna.

Utformningen av fundament beror mycket på det tillåtna jordtrycket σ_{till} då det sällan är den excentriserade hävarmen för den vertikala lasten som styr storleken utan minsta arean som krävs för att fördela lasten som sätter gränserna för fundamentens storlek

En förenkling i grasshoppermodellen är dess metod att uppskatta de stabiliserande enheternas influensarea. I skriptet tas ingen hänsyn till om enheten är placerad nära en vägg eller nära en annan enhet vilket medför att influensarean alltid beräknas vara halva pelaravståndet i kvadrat.

De stora svårigheterna har legat i att främst på ett smidigt sätt ta fram fundament av en vettig storlek. Eftersom fundamentstorleken i sig beror av fundamentstorleken behöver dessa beräkningar på något smidigt sätt itereras fram. Vår brist på tid gjorde att vi fick förenkla dimensioneringen av dessa för att få fram ett resultat som ger en någorlunda fingervisning på hur det skulle kunna se ut.

7.3 Fortsatta studier

Det finns ett par spår som vi påbörjat men på grund av tidsbrist inte hunnit utveckla:

Det första är att introducera och nyttja FEM-insticket Karamba för att redan i skriptet kunna få ut en mer noggran lastfördelnin den vi får fram i Robot.

Titta på alternativa sätt att generera väggar, till exempel skulle väggarna kunna generas inom ett område som specificerats på den inlästa Aritningen. Fördelen här vore att själva slumpgenereringen av väggarna utesluts och de först in på en någorlunda rätt plats för att sedan microoptimeras.

En tredje utvecklingsmöjlighet är att lägga in ekvationer för en överslagsdimensionering av bjälklag, pelare och balkar direkt i skriptet. Detta skulle kunna sätta en begränsning i hur stor belastning varje element kan ta upp. Överstiger lasten kapaciteten för en enhet läggs en till enhet in. Tillsammans med detta skulle en begränsning av bjälklagets förmåga att föra över skjuvkrafter läggas in och nyttjas.

En noggrannare fundamentdimensionering är också av intresse. Detta eftersom vid fundament idag i princip utgörs av en väldigt stor mängd betong som hålls ner i marken för att agera tyngd eller snarare motvikt. Och med dagens rådande klimatproblem och det faktum att betongindustrin har en stor miljöpåverkan bör dimensioneringen av fundament vara av stort intresse. Med en mer korrekt dimensionering av fundament skulle de stabiliserande enheterna kunna placeras i planet för att ta fram så små fundament som möjligt och därmed minska det totala betongbehovet för en byggnad.

Under arbetets gång har många försök till optimering genomförts med undermåliga resultat. Mycket tid gått åt till att försöka använda komponenten Galapagos. Galapagos tillåts kontrollera en eller flera indatavärden och jämför sedan beräkningsresultaten mot ett fast värde. Galapagosmotorn är bra på att jämföra Genomes mot ett fitness-kriterie. Det vill säga att . I praktiken innebär det att Galapagos kan styra till exempel väggplaceringar som Genomes och ställa in de värden så att till exempel en en minimal fundamentvolym uppnås, Fitnesskriterie. Dock har optimeringsförsök som gjorts inte genererat resultat är intressanta. När vi ställde Galapagos mot den totala betongmängden i systemet klumpar den ihop alla väggar mitt i byggnaden och sedan säger att schaktet i

mitten tar upp majoriteten av all last. Vid ett försök att maximera rotationsstyvheten systemet så skapar skriptet max antal väggar. Försöken som gjorts visar endast på vikten av att ställa upp en korrekt funktion för hur olika parametrar viktas samt att det inte får vara för många lösa variabler som ändras. Hur man ställer upp funktionen som fitnesskriteriet skall uppnå är alltså av stor vikt, samt antalet variabler som Galapagos får möjlighet att kontrollera. För många variabler och ett för enkelt kriterie att kröa optimeringen ger dåliga resultat. Ett område för fortsatta studier är att utveckla fitnesskriterier baserade på fler faktorer än till exempel en volym. Kanske kan en viktfunktion ställas upp där kriterier som antal enheter, volymer, avstånd mellan enheterna mm. kombineras för att ge ett bra resultat vid en optimering.

8 Litteraturförteckning

Ulf Bergdahl, Bo Stigson Malmborg, and Elvin Ottosson. *Plattgrundläggning*. Svensk Byggtjänst, 1993.

Alistair Borthwick, John Carpenter, Jon Wicks, Barry Clarke, and Roger Alexander Falconer. The importance of understanding computer analyses in civil engineering. In *Proceedings of the ICE-Civil Engineering*, volume 166, pages 137–143. ICE, 2013.

Wikimedia Commons. File:maqueta funicular.jpg — wikimedia commons, the free media repository, 2017a. URL https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Maqueta_funicular.jpg&oldid=252102245. [Online; accessed 18-January-2019].

Wikimedia Commons. File:malmö-turningtorso2005august15.jpg — wikimedia commons, the free media repository, 2017b. URL <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Malmö-TurningTorso2005August15.jpg&oldid=228412439>. [Online; accessed 18-January-2019].

Tord Isaksson and Annika Mårtensson. *Byggkonstruktion: Regel och Formelsamling*. Studentlitteratur AB, 2008.

Tord Isaksson, Annika Mårtensson, and Sven Thelandersson. *Byggkonstruktion*. Studentlitteratur AB, 2005.

Mogens Lorentsen, Tage Petersson, and Håkan Sundquist. *Stabilisering av byggnader*. Institutionen för byggkonstruktion, Kungl. tekniska högskolan, 2000.

Iain A MacLeod. Time to reflect: a strategy for reducing risk in structural design. *The Structural Engineer*, 94(3):14–18, 2016.

SS-EN1990. Eurokod – grundläggande dimensioneringsregler för bärverk (ss-en 1990), sis, 2002. ics: 91.010.30; 91.070.01; 91.070.50; 91.070.60. 2002.

SS-EN1991-1-1. Eurokod 1: Laster på bärverk – del 1-1: Allmänna laster – tunghet, egentyngd, nyttig last för byggnader, sis, 2002, ics: 91.010.30; 91.070.01; 91.070.50; 91.070.60. 2002.

SS-EN1991-1-4. Eurokod 1: Laster på bärverk – del 1-4: Allmänna laster – vindlast, (ss-en 1991-1-4:2005), sis, 2005. ics: 91.010.30; 91.070.01; 91.070.50; 91.070.60. 2005.

SS-EN1993-1-1. Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner - del 1-1: Allmänna regler och regler för byggnader (ssen 1993-1-1), sis, 2005. ics: 91.010.30;91.070.03;91.070.50;91.070.60;91.080.10. 2005.

A Dimensionerande laster

A.1 Karaktäristiska lastdata för båda byggnader

Av förenklingsskäl förutsätts båda byggnaderna ha samma geografiska läge vilket innebär att de karaktäristiska- och dimensionerande lasterna är de samma för båda fallen. För de båda byggnadernas stabiliserande enheter är det en kombination av utvändigt Vindlast och den horisontella snedställningslast som verkar på bjälklagen som är av intresse att studera.

A.1.1 Vindlast

I (SS-EN1991-1-4, 2005) utläses att det karaktäristiska värdet för utvändigt vindlast räknas fram med

$$w_e = q_p(Z_e) \cdot c_{pe} \quad (\text{A.1})$$

Där $q_p(z_e)$ är det karaktäristiska vindtrycket som beror av byggnadens höjd och en referensvindhastighet samt Terrängtyp som finns att alla finns att läsa av i kapitel tabell 1.12 från (Isaksson and Mårtensson, 2008).

c_{pe} är en formfaktor för utvändigt vindlast.

För en 21 meter hög byggnad i Malmö liggandes ut mot havet gäller terrängtyp 1 och referenshastighet $26\text{m}/2$. i tabell från (SS-EN1991-1-4, 2005) kan utläsas och interpoleras det karaktäristiska vindtrycket till $q_p = 1.35\text{kN}/\text{m}^2$.

Från kapitel 1.9 i (Isaksson and Mårtensson, 2008) kan värden för beräkning av c_{pe} utläsas till $0.8 - (-0.5) = 1.3$ där 0.8 kommer från den ett tryck mot lovartsidan och -0.5 från ett sug från läsidan.

Tabell A.1: Pelarfördelning per våningsplan och hela byggnaden för båda fallstudierna.

Byggnad	pelare/våning	totalt
Hus-ett	50	350
Telia	77	539

Insättning av $q_p = 1.35$ och $c_{pe} = 1.30$ i ekvation A.1 get en karaktäristik vindlast för de båda byggnaderna om

$$w_e = 1.755kN/m^2 \quad (\text{A.2})$$

A.1.2 Snedställningslast

Snedställningslasten uppkommer genom att de bärande enheterna har en initial snedställning och beskrivs som den vertikala lasten multiplicerad med snedställningsvinkeln för varje pelare. Snedställningsvinkeln beror även av antalet vertikalt lastbärande enheter i systemet (SS-EN1993-1-1, 2005). Eftersom Hus-ett är en fiktiv byggnad uppskattas antalet lastbärande enheter till 50 per våning och totalt 350 i systemet. Teliahuset har 77 per våning och totalt 539 vertikalt bärande enheter.

De dimensionerande lastkombinationerna skiljer sig lite mellan byggnaderna och räknas ut under respektive kapitel med hjälp av ekvation $STR^26.10b$ från (SS-EN1990, 2002).

$$q_d = \gamma_d 1,2 G_{kj,sup} + \gamma_d 1,5 Q_{k,1} + \gamma_d 1,5 \psi_0 Q_{k,2} \quad (\text{A.3})$$

Snedställningsvinkeln beskrivs i (SS-EN1993-1-1, 2005) och kan därefter skrivas som

$$\alpha_{md} = 0,003 + \frac{0.012}{\sqrt{n}} \quad (\text{A.4})$$

$$q_{h,k} = \alpha_{md} \cdot F_v \quad (\text{A.5})$$

$q_{h,k}$ beskriver den horisontella utbredda lasten och n beskriver antal lastbärande pelare.

Den vertikala lasten F_v , för byggnaden utgörs i huvudsak av bjälklagens egentyngt samt nyttiga lasten på dessa. Eftersom snedställningslasten

utgör en ytlast samt att det endast är en jämförbar last som eftersträvas bortses egentyngheden från de stabiliserande enheterna i här. Med en våningstjocklek på $0.3m$ och en betongtyngd på $25kN$ blir egentyngheden för bjälklagen $7.5kN$. Från (SS-EN1991-1-1, 2002) utläses att nyttiglasten för en kontorsbyggnad är $2.5kN/m^2$.

Tabell A.2: tabell för Tyngder till snedställningslast per kvadratmeter

Bjälklag egentynghd:	EGT_{BJL}	$7.5kN/m^2$
Nyttig last kontor:	NL_{kontor}	$2.5kN/m^2$

Ekvation A.4 ger med pelarantal från tabell A.1 Värderna för snedställningslasten.

$$\alpha_{md,hus-ett} = 0,003 + \frac{0.002}{\sqrt{50}} = 0.0047$$

$$\alpha_{md,hTelia} = 0,003 + \frac{0.002}{\sqrt{77}} = 0.0044$$

Byggnad	Snedställningsvinkel
Hus-ett	0.0047
Telia	0.0044

Tabell A.3: Sammanställning av snedställningsvinklar för bestämmande av horisontal last på grund av snedställning.

B Resultat Grasshopper

B.1 Grasshopper

B.1.1 Hus-ett

Tröghetsmoment

Tabell B.1: Tröghetsmoment

Enhet	$I_x [m^4]$	$I_y [m^4]$
0	1.07	0.003
1	1.07	0.003
2	1.07	0.003
3	1.07	0.003
4	7.3	7.3
Summa	11.6	7.3

Enheternas tyngdpunkts koordinater

Tabell B.2: Rotationscentrum

Enhet	TP_x [m]	TP_y [m]
0	0.1	2
1	99.9	2
2	99.9	16
3	0.1	16
4	60	9
e_x, e_y	56.3	9

Avstånd mellan enheternas tyngdpunkter och vridcentrum.

Tabell B.3: Avstånd mellan enheters tyngdpunkt till vridcentrum

Ekvation $e_x - x_i$		
Enhet	r_x [m]	r_y [m]
0	56	7
1	-44	7
2	-44	-7
3	56	-7
4	-4	0

$$\sum r_i^2 \cdot I_i = 10894$$

Tabell B.4: Horisontell last per enhet

Enhet	Q_x [kN]	Q_y [kN]
0	0.01	113
1	0.01	58
2	-0.01	58
3	-0.01	113
4	0.00	548

Det stjälpande och det stabiliserande momentet för hela enheten

Tabell B.5: Stjälpande- och stabiliserandemoment för hela enheten

Enhet	Stjälpande [kNm]	Stabiliserande [kNm]
0	10271	15421
1	5269	11708
2	5269	11708
3	10271	15421
4	49911	54516

Det stjälpande och det stabiliserande momentet för väggarna

Tabell B.6: Stjälpande- och stabiliserandemoment för väggarna

Enhet	Stjälpande [kNm]	Stabiliserande [kNm]
0	9481	6796
1	4863	6796
2	4863	6796
3	9481	6796
E4	46072	14790

Beräkning av vertikalalasten per enhet

Tabell B.7: Vertikallast per enhet

Enhet	Fv [kN]
0	3778
1	3778
2	3778
3	3778
4	8424

Kontroll av utnyttjande graden. hur mycket moment de utsätts för jämfört med hur mycket de klarar. Jämför hela enheten och väggen.

Tabell B.8: Uttnyttjandegrad

Enhet	Hela Enheten [%]	Vägg [%]
0	0,7	1,4
1	0,5	0,7
2	0,5	0,7
3	0,7	1,4
4	0,9	3,1

Fundamentdimensioner

Tabell B.9: Dimensioner på fundament

Enhet	x [m]	y [m]
0	2	11
1	2	9
2	2	9
3	2	11
4	6	17

Kontroll av den horisontala stabiliteten, Roterarbyggnaden på grund av den excentriska resulterande kraften

Tabell B.10: Mothållande moment på grund av Q_x och Q_y

Mothållande moment, $F \cdot e$						
Enhet	Fx [kN]	ey [m]	Mx [kNm]	Fy [kN]	ex [m]	My [kNm]
0	0.07	7.0	0.47	790	56.2	44417
1	0.07	7.0	0.47	405	-43.6	-17662
2	-0.07	-7.0	0.47	405	-43.6	-17662
3	-0.07	-7.0	0.47	790	56.2	44417
4	0.00	0.0	0	3839	-3,7	-14136
summa			1.9 kNm			39375 kNm

Tabell B.11: Vridande moment pga den utbredda vindlasten

Vridande moment, $F_{vind} \cdot e$		
	x	y
RC	56,32054	8,997814
TP	50	9
huslängd	100	m
husbredd	18	m
hushöjd	21	m
qvind	2,97	kN/m ²
Fvind	6230	kN
evind	-6,32	m
Mvind	-39377	kNm

Summan av alla moment i plan ger en resulterande vridning. Moment hämtas från tabell B.10 och B.11

$$M_{rotation,Hus-ett} = \sum 39375 + 1.9 + (-39377) = 0 \quad (\text{B.1})$$

B.1.2 Telia

Beräknar enheternas tyngdpunkt/ rotationscentrum

Tabell B.12: Rotationscentrum

Enhet	TP_x [m]	TP_y [m]
0	0.4	13.1
1	25.9	11.9
2	59.8	14.1
3	54.0	47.6
4	0.4	49.0
e_x, e_y	33	32

Avstånd mellan enheternas tyngdpunkter och och byggnadens vridcentrum.

Tabell B.13: Avstånd mellan enheters tyngdpunkt till vridcentrum för byggnaden

Enhet	r_x [m]	r_y [m]
0	33	19
1	7	20
2	-27	18
3	-21	-16
4	33	-17

$\sum r_i^2 \cdot I_i = 10894$
tröghetsmoment

Tabell B.14: Tröghetsmoment

Enhet	$I_x [m^4]$	$I_y [m^4]$
0	17.20	0.01
1	29.66	24.65
2	39.85	50.29
3	13.01	85.91
4	17.64	0.01
Summa	117.36	160.86

Tabell B.15: Horisontell last per enhet

Enhet	$Q_x [kN]$	$Q_y [kN]$
0	-0.002	92
1	-9	173
2	-16	257
3	25	83
4	0.003	95

Det stjälpande och det stabiliserande momentet för hela enheten

Tabell B.16: Stjälpande och stabiliserande moment för varje enhet

Enhet	Stjälpande [kNm]	Stabiliserande[kNm]
0	8405	31432
1	15758	40862
2	23429	55586
3	7523	33830
4	8618	31816
Summa	63733	193525

Det stjälpande och det stabiliserande momentet för väggarna

Tabell B.17: Stjälpande- och stabiliserandemoment för väggarna.

Enhet	Stjälpande[kNm]	Stabiliserande[kNm]
0	7759	32157
1	14546	40263
2	21626	52393
3	6945	23476
4	7955	32676
Summa	58830	180966

Beräkning av vertikal last per enhet

Tabell B.18: Vertikal last fördelat per enhet.

Enhet	Fv [kN]
0	7129
1	15077
2	18575
3	17713
4	7185

Kontroll av utnyttjandegraden genom jämförande av hur mycket moment de utsätts för dividerat med dess kapacitet. jämför hela enheten och väggen.

Tabell B.19: uttntnyttjandegrad.

Enhet	Vägg + fundament	Vägg
0	0,3	0,2
1	0,4	0,4
2	0,4	0,4
3	0,2	0,3
4	0,3	0,2

Fundamentdimensioner

Tabell B.20: fundament

Enhet	x	y
0	2	13
1	8	8
2	10	9
3	13	6
4	2	13

Kontroll av den horisontala stabiliteten, ”Roterar” byggnaden på grund av den excentriska resulterande kraften

Tabell B.21: Mothållande moment på grund av Q_x och Q_y

Mothållande moment, $F \cdot e$						
Enhet	Fx [kN]	ey [m]	Mx [kNm]	Fy [kN]	ex [m]	My [kNm]
0	-0.02	18.5	0	647	32.6	21081
1	-62	19.7	-1234	1212	7.1	8546
2	-113	17.5	-1986	1802	-26.9	-48440
3	175	-15.9	-2800	579	-21.0	-12180
4	0	-17.3	0	663	32.6	21603
summa			-6020			-9389

Tabell B.22: Vridande moment pga den utbredda vindlasten

Vridande moment, $F_{vind} \cdot e$		
	x	y
RC	33	32
TP	36.1	27
huslängd	72.2	m
husbredd	54.7	m
hushöjd	21	m
qvind	3.23	kN/m ²
Fvind	4902	kN
evind	3.14	m
Mvind	15395	kNm

Summan av alla moment i plan ger en resulterande vridning. Moment hämtas från tabell B.21 och B.22

$$M_{rotation,Telia} = \sum -9389 + (-6020) + 15395 = -14 \quad (\text{B.2})$$

Summan blir nästan 0, troligtvis är det ett avrundningsfel.

C Resultat handberäkningar

C.1 Handberäkningar

C.1.1 Hus-ett

Tröghetsmoment

Tabell C.1: Tröghetsmoment

Enhet	$I_x [m^4]$	$I_y [m^4]$
1	1.07	0.003
2	1.07	0.003
3	1.07	0.003
4	1.07	0.003
5	7.3	7.3
Summa	11.6	7.3

Beräkning av rotationscentrum.

Tabell C.2: Rotationscentrum e_x, e_y

Enhet	TP_x [m]	TP_y [m]
0	0.1	2
1	99.9	2
2	99.9	16
3	0.1	16
4	60	9
e_x, e_y	56.3	9

Beräkning av avstånd mellan enheters tyngdpunkt och byggnadens rotationcentrum i x- och y-led.

Tabell C.3: Hävarmar r_y, r_x

Enhet	r_x [m]	r_y [m]
0	56.2	7
1	-43.6	7
2	-43.6	-7
3	56.2	-7
4	-3.7	0

$$\sum r_i^2 \cdot I_i = 10894.3$$

Beräknar den horisontella lasten per enhet.

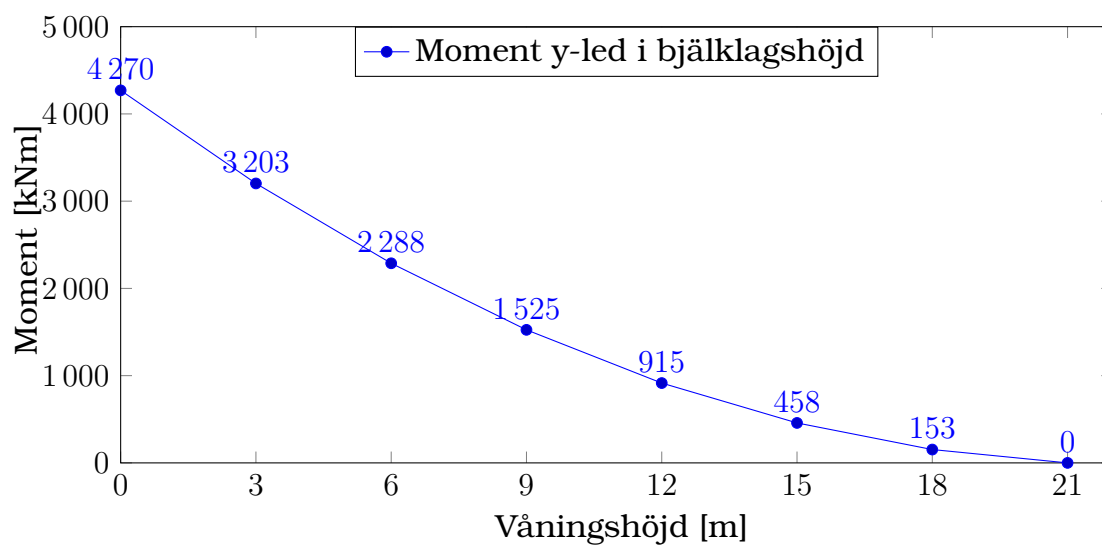
Tabell C.4: Horisontellast per enhet.

Enhet	Q_x [kN]	Q_y [kN]
0	0.01	50.8
1	0.01	105.8
2	-0.01	105.8
3	-0.01	50.8
4	0.00	576.7

Momentberäkningar på grund av Q_y från tabell C.4

Tabell C.5: Moment per enhet på grund av lasten Q_y .

höjd	E0	E1	E2	E3	E4
21	0	0	0	0	0
18	338	173	173	338	1646
15	1015	520	520	1015	4939
12	2030	1041	1041	2030	9878
9	3384	1734	1734	3384	16464
6	5076	2601	2601	5076	24696
3	7106	3642	3642	7106	34574
0	9475	4856	4856	9475	46099



Figur C.1: Moment i botten av skjuvväggar i y-led på stabiliserande enhet 0 i teliahuset
momentberäkningar pga Q_y

Tabell C.6: Moment per enhet från Q_x .

höjd	E0	E1	E2	E3	E4
21	0,0	0,0	0,0	0,0	0
18	0,0	0,0	0,0	0,0	0
15	0,1	0,1	-0,1	-0,1	0
12	0,2	0,2	-0,2	-0,2	0
9	0,3	0,3	-0,3	-0,3	0
6	0,4	0,4	-0,4	-0,4	0
3	0,6	0,6	-0,6	-0,6	0
0	0,8	0,8	-0,8	-0,8	0

Fundament kontroll:

Fundamentets dimensioner som beräknades fram i Grasshopper redovisas i tabell C.7

Tabell C.7: Fundament dimensioner i Hus-ett.

Enhet	d	b	L
0	1	2.2	11.25
1	1	2.2	8.87
2	1	2.2	8.87
3	1	2.2	11.25
4	1	6	16.1

Volymen och vikten redovisas i tabell C.8.

Tabell C.8: Fundamentvolym och vikt

Enhet	Fundamentvolym	Tyngd
0	25	594
1	20	468
2	20	468
3	25	594
4	97	2316

Tabell C.9 visar väggarnas area och tyngd.

Tabell C.9: Väggararnas area och tyngd

Enhet	Väggarea	Väggtyngd
0	0.8	403
1	0.8	403
2	0.8	403
3	0.8	403
4	3	1530

Influensarean och tyngd från bjälklaget och nyttiga lasten per våning redovisas i tabell C.10. Den samlade lasten från samtliga våningar redovisas i Tabell C.11

Tabell C.10: Enheternas influensarea samt bjälklagets tyngd och nyttig last per våning.

Enhet	Influensarea	Bjälklagstyngd	Nyttig last
0	13.2	95	33
1	13.2	95	33
2	13.2	95	33
3	13.2	95	33
4	64	461	160

Tabell C.11: Enheternas bjälklagets tyngd och nyttig last för samtliga våningar.

Enhet	Bjälklagstyngd	Nyttig last
0	665	231
1	665	231
2	665	231
3	665	231
4	3226	1120

Totala egentyngden samt den totala vertikala lasten redovisas i tabell C.12

Tabell C.12: Totala egentyngden och vertikal last.

Enhet	Total egentyngd	Vertikal last
0	1663	2342
1	1537	2191
2	1537	2191
3	1663	2342
4	7072	10167

Beräkningarna för att ta fram lasten Q_y per enhet och våning redovisas i appendix C. Summan av lasten multipliceras med avståndet mellan bjälklagen där lasten verkar och fundamentets underkant. Detta ger momentet vid fundamentets underkant, momentet redovisas i C.13

Tabell C.13: Moment i underkant av fundament.

Våning	Höjd	E0	E1	E2	E3	E4
7	22	2482	1272	1272	2482	12074
6	19	2143	1098	1098	2143	10427
5	16	1805	925	925	1805	8781
4	13	1466	751	751	1466	7134
3	10	1128	578	578	1128	5488
2	7	790	405	405	790	3842
1	4	451	231	231	451	2195
Moment		10265	5260	5260	10265	49941

Genom att dividera moment med vertikal last beräknas en hävarm som redovisas i tabell C.14 i samma tabell redovisas hur stort avståndet s är som är avståndet mellan hävarmen och ytterkanten på fundamentet, se Figur 3.5

Enhet	Hävarm *	s
0	4.4	1.2
1	2.4	2.0
2	2.4	2.0
3	4.4	1.2
4	4.9	3.1

Tabell C.14: Hävarmen, H för lasten och avståndet, s

Den tryckta arean ges av två gånger sträckan s multiplicerat med fundamentbredden som redovisas i tabell C.15 där också den maximala lastkapaciteten för fundamentet redovisas.

Tabell C.15: Tryckta arean och den mothållande lasten

Enhet	Trycktaarean [m ²]	Mothållande kraft [kN]
0	5	1641
1	9	2685
2	9	2685
3	5	1641
4	38	11272

Om den vertikala lasten divideras med lastkapaciteten framgår det om jorden klarar lasten eller inte. Kvoten visas i tabell C.16 . Då fundamentet är dimensionerat att precis klara lasten den utsätts för bör kvoten bli ett.

Tabell C.16: beräknar kvot mellan vad vertikallasten och lastkapaciteten

Enhet	Kontroll
0	1.4
1	0.8
2	0.8
3	1.4
4	0.9

Tabel över stabiliserande- och stjälpande moment på grund av Q_y vid underkant vägg.

Tabell C.17: Moment

Enhet	Stjälp. moment $Q_y \cdot Hvarm$	Stab. moment $F_v \cdot Hvarm$
0	9474	3258
1	4855	3258
2	4855	3258
3	9474	3258
4	46099	14775

Tabell över stabiliserande- och stjälpande moment på grund av Q_y vid underkant vägg.

Tabell C.18: Moment

Enhet	Stjälp. moment $Q_y \cdot Hvarm$	Stab. moment $F_v \cdot Hvarm$
0	10264	10305
1	5260	5258
2	5260	5258
3	10264	10304
4	49940	49818

Kontroll av den horisontala stabiliteten, Roterarbyggnaden på grund av den excentriska resulterande kraften

Tabell C.19: Mothållande moment på grund av Q_x och Q_y

Mothållande moment, $F \cdot e$						
Enhet	Fx [kN]	ey [m]	Mx [kNm]	Fy [kN]	ex [m]	My [kNm]
0	0.1	7.0	0.5	790	56.2	44391
1	0.1	7.0	0.5	405	-43.6	-17633
2	-0.1	-7.0	0.5	405	-43.6	-17633
3	-0.1	-7.0	0.5	790	56.2	44391
4	0.0	0.0	0.0	3842	-3.7	-14126
summa			1.9 kNm			39389 kNm

Tabell C.20: Vridande moment pga den utbredda vindlasten

Vridande moment, $F_{vind} \cdot e$		
	x	y
RC	56.32285347	9
TP	50	9
huslängd	100	m
husbredd	18	m
hushöjd	21	m
qvind	2.966666667	kN/m ²
Fvind	6230	kN
evind	-6.32	m
Mvind	-39391	kNm

Summan av alla moment i plan ger en resulterande vridning. Moment hämtas från tabell C.19 och C.20

$$M_{rotation,Hus-ett} = \sum 39389 + 1.9 + (-39391) = 0 - > ok! \quad (C.1)$$

C.1.2 Telia

Tröghetsmoment

Tabell C.21: Tröghetsmoment

Enhet	$I_x [m^4]$	$I_y [m^4]$
0	17	0,01
1	30	25
2	40	50
3	13	86
4	18	0,01
Summa	117	161

Beräkning av rotationscentrum

Tabell C.22: Rotationscentrum e_x, e_y

Enhet	TP_x [m]	TP_y [m]
0	0.4	13.1
1	25.4	9.9
2	59.6	11.9
3	54.1	47.6
4	0.4	49.1
e_x, e_y	33	31

Beräkning av avstånd mellan enheters tyngdpunkt och byggnadens rotationcentrum i x- och y-led.

Tabell C.23: Hävarmar r_y, r_x

Enhet	r_x [m]	r_y [m]
0	32	18
1	7	21
2	-27	19
3	-21	-17
4	32	-18

$$\sum r_i^2 \cdot I_i = 10894.3$$

Beräknar den horisontella lasten per enhet.

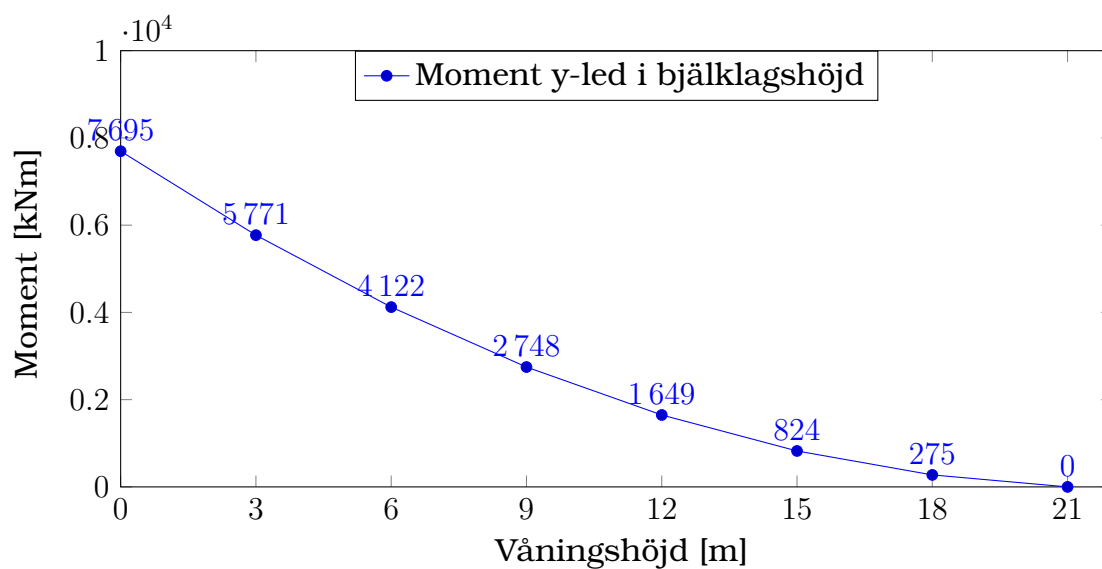
Tabell C.24: Horisontellast per enhet.

Enhet	Q_x [kN]	Q_y [kN]
0	0	92
1	-10	173
2	-19	259
3	29	83
4	0	94
Summa	0	700

momentberäkningar pga Q_y från tabell ??

Tabell C.25: Moment per enhet pga lasten Q_y

Höjd	E0	E1	E2	E3	E4
21	0	0	0	0	0
18	275	518	777	249	282
15	824	1554	2330	748	846
12	1649	3109	4661	1497	1691
9	2748	5182	7768	2494	2818
6	4122	7772	11652	3741	4228
3	5771	10881	16312	5238	5919
0	7695	14508	21750	6984	7892



Figur C.2: Moment i botten av skjuvväggar i y-led på stabiliserande enhet 0 i Teliahuset
momentberäkningar pga Q_y

Tabell C.26: Moment per enhet från Q_x redovisat som kNm

Höjd	E0	E1	E2	E3	E4
21	0	2	4	6	8
18	0	-30	-56	87	0
15	0	-91	-168	260	0
12	0	-183	-337	519	0
9	0	-304	-561	866	0
6	0	-457	-842	1298	0
3	0	-639	-1179	1818	0
0	0	-852	-1571	2424	0

Fundamentkontroll:

Tabell C.27: Fundamentens dimensioner i Telia byggnaden

Enhet	d [m]	b [m]	L [m]
0	1	2.2	13.10
1	1	8.3	8.16
2	1	9.7	8.94
3	1	13.1	5.79
4	1	2.2	13.15

Fundamentvolym och tyngd redovisas i tabell C.28

Tabell C.28: Fundament- volym och tyngd

Enhet	Fundamentvolym [m^3]	tyngd [kN]
0	29	696
1	68	1622
2	86	2070
3	76	1824
4	29	703

Väggarnas bottenarea och tyngd redovisas i Figur C.29

Tabell C.29: Veggarnas area och tyngd

Enhet	Väggarea [m^2]	Väggtyngd [kN]
0	2	1040
1	6	3191
2	9	4529
3	7	3778
4	2	1068

Influensarean och tyngd från bjälklaget och nyttiga lasten per våning redovisas i tabell C.30. Den samlade lasten från samtliga våningar redovisas i Tabell C.31

Tabell C.30: Influensarea

Enhet	Influensarea [m^2]	Bjälklagstyngd [kN]	Nyttig last [kN]
0	20	144	50
1	107	768	267
2	124	892	310
3	125	898	312
4	144	144	50

Tabell C.31: Bjälklagslast och nyttiglast från samtliga 7 våningar

Enhet	Bjälklagstyngd [kN]	Nyttig last [kN]
0	1008	350
1	5376	1867
2	6242	2167
3	6287	2183
4	1008	350

Den totala egentyngheden samt den totala vertikala lasten redovisas i tabell C.32

Tabell C.32: Totala egentynghden och totala vertikallasten

Enhet	Total egentynghd [kN]	Total vertikaltynghd [kN]
0	2744	3818
1	10188	15026
2	12842	1866
3	11889	17541
4	2779	3860

Momentet vid fundamentets underkant redovisas i C.33

Tabell C.33: Moment i underkant av fundament redvisad i kNm

Våning	Höjd	E0	E1	E2	E3	E4
7	22	2015	3800	5696	1829	2067
6	19	1740	3282	4920	1580	1785
5	16	1466	2763	4143	1330	1503
4	13	1191	2245	3366	1081	1221
3	10	916	1727	2589	831	939
2	7	641	1209	1812	582	658
1	4	366	691	1036	333	376
Moment	0	8336	15717	23562	7566	8549

I tabellC.34 redovisar hävarmen och avståndet s . Enter det redovisas den tryckta arean och lastkapaciteten i tabell C.35

Tabell C.34: Hävarmen, H och avståndet, s

Enhet	Hävarm [m]	s [m]
0	2.2	4.4
1	1.0	3.0
2	1.3	3.2
3	0.4	2.5
4	2.2	4.4

Tabell C.35: Tryckta arean och lastkapacitet

Enhet	trycktaarea [m^2]	lastkapacitet [kN]
0	19	5796
1	50	15073
2	62	18567
3	65	19398
4	19	5827

Kontrollen av förhållandet mellan den vertikala lasten och lasten som enheten klarar redovisas i C.36

Tabell C.36: beräknar kvot mellan vertikallasten och lastkapaciteten

Enhet	Kontroll
0	0.7
1	1.0
2	1.0
3	0.9
4	0.7

Tabell över stabiliserande- och stjälpande moment på grund av Q_y vid underkant vägg.

Tabell C.37: Moment

Enhet	Stjälp. moment $Q_y \cdot H_{varm}$	Stab. moment $F_v \cdot H_{varm}$
0	7694	14914
1	14508	39238
2	21749	-1854
3	6983	26098
4	7891	15082

Tabell över stabiliserande- och stjälpande moment på grund av Q_y vid underkant vägg.

Tabell C.38: Moment

Enhet	Stjälp. moment $Q_y \cdot Hvarm$	Stab. moment $F_v \cdot Hvarm$
0	8336	8400
1	15717	15026
2	23562	2425
3	7565	7016
4	8549	8492

Kontroll av den horisontala stabiliteten, Roterarbyggnaden på grund av den excentriska resulterande kraften.

Tabell C.39: Mothållande moment på grund av Q_x och Q_y

Mothållande moment, $F \cdot e$						
Enhet	Fx [kN]	ey [m]	Mx [kNm]	Fy [kN]	ex [m]	My [kNm]
0	0.0	17.6	0	641	32.4	20777
1	-71.0	20.8	-1477	1209	7.3	8839
2	-131.0	18.8	-2462	1812	-26.8	-48577
3	202.0	-17.0	-3428	582	-21.3	-12419
4	0.0	-18.4	0	658	32.4	21309
summa			-7368 kNm			-10070 kNm

Tabell C.40: Vridande moment pga den utbredda vindlasten

Vridande moment, $F_{vind} \cdot e$		
	x	y
RC	33	30.7
TP	36.1	27
huslängd	72.2	m
husbredd	54.7	m
hushöjd	21	m
qvind	3.233333333	kN/m ²
Fvind	4902	kN
evind	3.35	m
Mvind	16413	kNm

Summan av alla moment i plan ger en resulterande vridning. Moment hämtas från tabell C.39 och C.40

$$M_{rotation,Telia} = \sum -10070 + (-7368) + 16413 = -1025kNm - > ejok! \quad (C.2)$$

1020 kNm för mycket. Det som verkar skilja är storleken på Fx jämfört med för grasshopper. Beror troligtvis på fel vid framtagning av I och e då Teliabyggnadens geometrier både för byggnaden men också schakten är komplexa.

D FEM-resultat från Robot

Alla värden i appendix D är om inget annat anges manuellt avlästa och inskrivna. Tvärkraften representeras av integralvärdet för tvärsnittet uppmätt var tredje meter på halva våningshöjden för var enskild våning.

D.1 Hus-ett

D.1.1 Tvärkraft

Tabell D.1: Tvärkraft genom alla stabiliserande enheter (E) för vind längs långsidan (y-led) med med höjd beräknad från underkant stabiliserande enhet avläst ur Robot.

Våning	Höjd [m]	E0 [kN]	E1 [kN]	E2 [kN]	E3 [kN]	E4 [kN]
7	19.5	102	54	54	102	588
6	16.5	217	116	116	217	1134
5	13.5	338	186	186	338	1651
4	10.5	464	262	262	465	2145
3	7.5	593	341	342	594	2626
2	4.5	723	420	420	722	3113
1	1.5	850	495	488	843	3612

Tabell D.2: Tvärkraft genom alla stabiliserande enheter (E) för vind längs kortsidan (x-led) med med höjd beräknad från underkant stabiliserande enhet.

Våning	Höjd [m]	E0 [kN]	E1 [kN]	E2 [kN]	E3 [kN]	E4 [kN]
7	19.5	0	0	0	0	249
6	16.5	0	0	0	0	498
5	13.5	0	0	0	0	747
4	10.5	0	0	0	0	997
3	7.5	0	0	0	0	1245
2	4.5	0	0	1	0	1501
1	1.5	-1	-1	1	1	1722

Q_x och Q_y beräknas genom att tvärkraften från den överliggande våningen subtraheras från underliggande vånings. Ett medelvärde för Q_y bestäms för att kunna jämföra beräkningsresultat med Grasshopperskriptet och handberäkningarna se tabell D.3

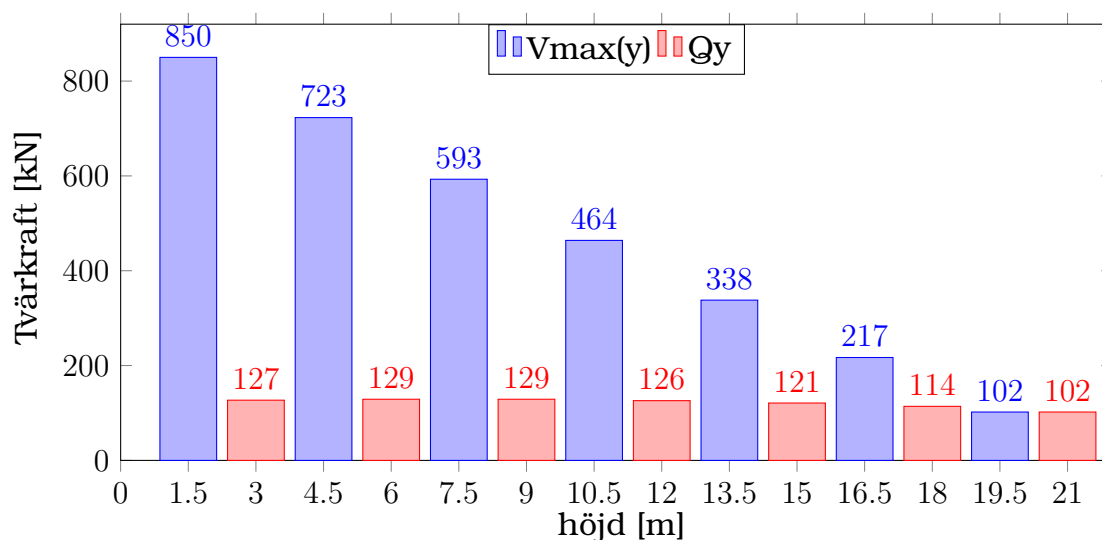
D.1.2 Horisontalkraft

Tabell D.3: Q_y i bjälklagsnivå på alla stabiliserande enheter (E) för vind längs långsidan. Beräknad med V-värden från tabell D.1 (y-led) med med höjd beräknad från underkant stabiliserande enhet samt framräknat medelvärde per enhet

ekvation 3.16, $Q_{i,n} = V_n - V_{n-1}$						
Våning	Höjd [m]	E0 [kN]	E1 [kN]	E2 [kN]	E3 [kN]	E4 [kN]
7	21	102	54	54	102	588
6	18	114	62	62	114	547
5	15	121	70	70	122	517
4	12	126	76	76	127	494
3	9	129	79	80	129	481
2	6	129	79	78	128	486
1	3	127	75	69	121	499
Medel		121	71	70	120	516

Tabell D.4: Q_x i bjälklagsnivå på alla stabiliserande enheter (E) för vind längs kortsidan. Beräknad med V-värden från tabell D.2 (x-led) med med höjd beräknad från underkant stabiliserande enhet samt framräknat medelvärde per enhet

ekvation 3.16, $Q_{i,n} = V_n - V_{n-1}$						
Våning	Höjd [m]	E0 [kN]	E1 [kN]	E2 [kN]	E3 [kN]	E4 [kN]
7	21	0	0	0	0	249
6	18	0	0	0	0	249
5	15	0	0	0	0	249
4	12	0	0	0	0	250
3	9	0	0	0	0	248
2	6	0	-1	1	0	256
1	3	0	0	0	1	221
Medel		0	0	0	0	246



Figur D.1: Tvärkraft i mitten av skjuvväggar samt tillskott av horisontal-last förlast y-led på stabiliserande enhet 0 i Hus-ett med värden tagna från tabell D.1 och D.3

D.1.3 Moment

Momentet genom en enhet beräknas enligt ekvation 3.15 och summeras nedan i tabell D.6

Tabell D.5: Moment, M_x , i bjälklagsnivå på alla stabiliserande enheter (E) för vind längs långsidan (y-led) med med höjd beräknad från underkant stabiliserande enhet.

ekvation 3.15 $M_0 = Q_{y,1} * h_1 + .. + Q_{y,n-1} * h_{n-1}$						
Vån.	H [m]	E0 [kNm]	E1 [kNm]	E2 [kNm]	E3 [kNm]	E4 [kNm]
7	21	0	0	0	0	0
6	18	307	163	162	307	1763
5	15	957	510	510	957	5166
4	12	1971	1067	1067	1972	10118
3	9	3364	1852	1854	3366	16554
2	6	5144	2876	2880	5148	24433
1	3	7312	4137	4139	7315	33771
0	0	9861	5622	5604	9844	44606

Tabell D.6: Moment, M_y , i bjälklagsnivå på alla stabiliserande enheter (E) för vind längs kortsidan (x-led) med med höjd beräknad från underkant stabiliserande enhet.

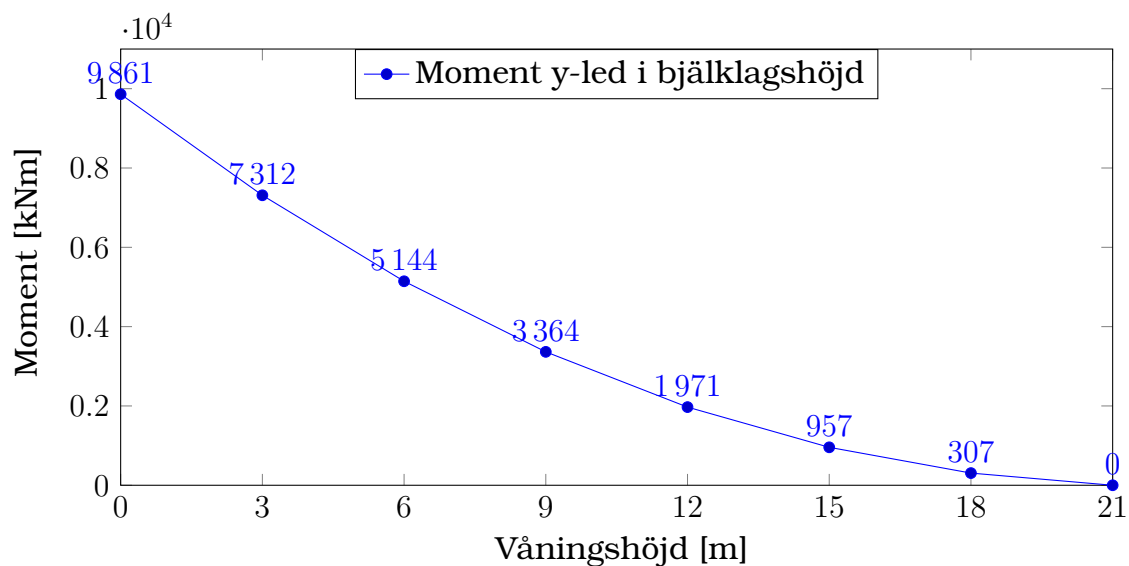
ekvation 3.15 $M_0 = Q_{y,1} * h_1 + .. + Q_{y,n-1} * h_{n-1}$						
Vån.	H [m]	E0 [kNm]	E1 [kNm]	E2 [kNm]	E3 [kNm]	E4 [kNm]
7	21	0	0	0	0	0
6	18	0	0	0	0	748
5	15	0	0	0	0	2242
4	12	0	0	0	0	4484
3	9	-1	1	0	0	7475
2	6	-1	2	-1	0	11211
1	3	-2	0	1	-2	15714
0	0	-4	-1	3	0	20881

Tabell D.7: Momment, och horisontallast som verkar på fundament fördelat per enhet med vind i Y-led. Tabellvärden från D.6

Enhet [m]	Moment [kNm]	Q _y [kN/vån]	Momentandel [%]
0	9861	121	13
1	5622	71	7
2	5904	70	7
3	9844	120	13
4	44606	516	59
TOTAL	75538	898	100

Tabell D.8: Momment och horisontallast som verkar på fundament fördelat per enhet med vind i X-led.

Enhet [m]	Moment [kNm]	Q _x [kN/vån]	Momentandel [%]
0	-4	0	0
1	-1	0	0
2	3	0	0
3	0	0	0
4	20881	246	100
TOTAL	20881	246	100



Figur D.2: Momentfördelning längs en skjuvvägg med vindlast i y-led på stabiliserande enhet 0 i Hus-ett med värden tagna från tabell D.6.

D.2 Telia

D.2.1 Tvärkraft

Tabell D.9: Tvärkraft genom alla stabiliserande enheter (E) för vind längs långsidan (y-led) med med höjd beräknad från underkant stabiliserande enhet avläst ur Robot.

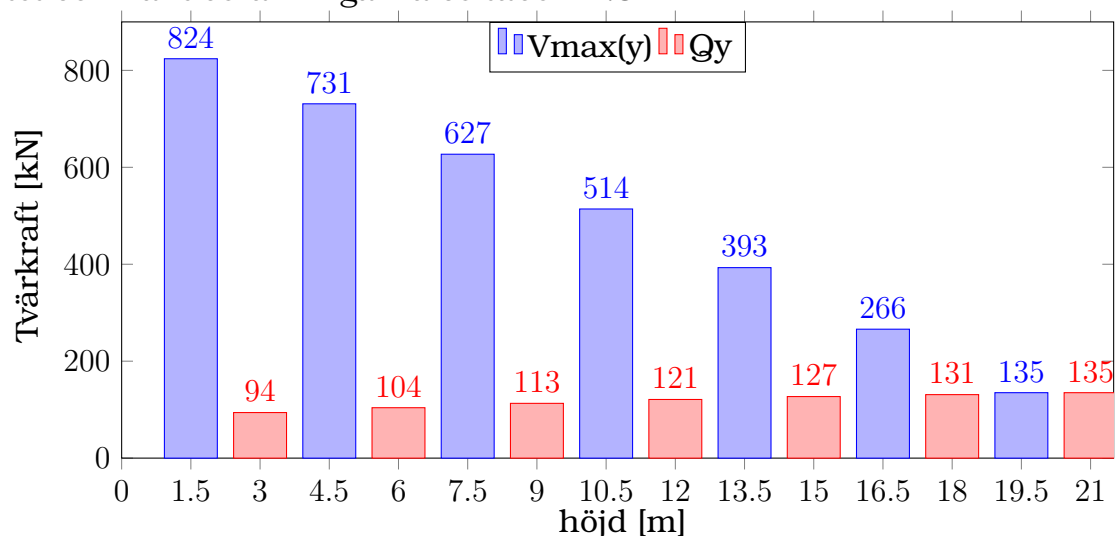
Våning	Höjd [m]	E0 [kN]	E1 [kN]	E2 [kN]	E3 [kN]	E4 [kN]
7	19.5	127	179	300	80	61
6	16.5	255	364	579	179	113
5	13.5	379	561	851	281	156
4	10.5	500	774	1117	384	192
3	7.5	615	1007	1370	491	221
2	4.5	720	1269	1597	607	242
1	1.5	815	1565	1805	723	259

Tabell D.10: Tvärkraft genom alla stabiliserande enheter (E) för vind längs kortsidan (x-led) med med höjd beräknad från underkant stabiliserande enhet.

Våning	Höjd [m]	E0 [kN]	E1 [kN]	E2 [kN]	E3 [kN]	E4 [kN]
7	19.5	-6	66	141	230	2
6	16.5	-13	128	283	465	2
5	13.5	-18	188	425	702	2
4	10.5	-22	244	566	942	2
3	7.5	-24	295	702	1190	2
2	4.5	-24	346	823	1456	3
1	1.5	-23	413	1007	1724	4

Q_x och Q_y beräknas genom att tvärkraften från den överliggande våningen subtraheras från underliggande vånings. Ett medelvärde för Q_y be-

stäms för att kunna jämföra beräkningsresultat med Grasshopperskriptet och handberäkningarna se tabell D.3



Figur D.3: Tvärkraft i mitten av skjuvväggar samt tillskott av horisontallast för 1st i y-led på stabiliserande enhet 0 i teliahuset. Värden tagna från tabell

D.2.2 horisontalkraft

Tabell D.11: Q_y i bjälklagsnivå på alla stabiliserande enheter (E) för vind längs långsidan. Beräknad med V-värden från tabell D.9 (y-led) med höjd beräknad från underkant stabiliserande enhet samt framräknat medelvärde per enhet

ekvation 3.16, $Q_{i,n} = V_n - V_{n-1}$						
Våning	Höjd [m]	E0 [kN]	E1 [kN]	E2 [kN]	E3 [kN]	E4 [kN]
7	21	127	179	300	80	61
6	18	127	186	279	98	52
5	15	125	197	272	102	44
4	12	121	212	266	103	36
3	9	115	233	252	107	28
2	6	106	262	227	116	22
1	3	95	295	208	115	17
Medel		116	224	258	103	37

Tabell D.12: Q_x i bjälklagsnivå på alla stabiliserande enheter (E) för vind längs kortsidan. Beräknad med V-värden från tabell D.10 (x-led) med med höjd beräknad från underkant stabiliserande enhet samt framräknat medelvärde per enhet

ekvation 3.16, $Q_{i,n} = V_n - V_{n-1}$						
Våning	Höjd [m]	E0 [kN]	E1 [kN]	E2 [kN]	E3 [kN]	E4 [kN]
Våning	Höjd	E0	E1	E2	E3	E4
7	21	-6	66	141	230	2
6	18	-6	63	141	235	0
5	15	-5	60	142	237	0
4	12	-4	56	142	240	0
3	9	-2	52	135	248	0
2	6	0	50	122	266	1
1	3	1	67	184	269	1
Medel	0	-3	59	144	246	1

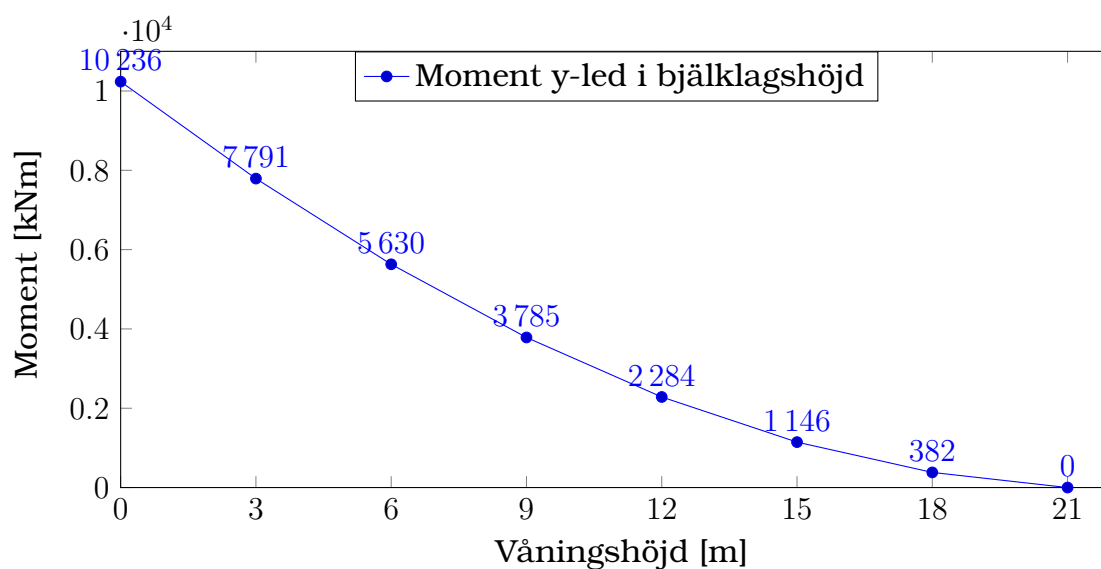
D.2.3 Moment

Tabell D.13: Moment, M_x , i bjälklagsnivå på alla stabiliserande enheter (E) för vind längs långsidan (y-led) med med höjd beräknad från underkant stabiliserande enhet.

ekvation 3.15 $M_0 = Q_{y,1} * h_1 + .. + Q_{y,n-1} * h_{n-1}$						
Vån.	H [m]	E0 [kNm]	E1 [kNm]	E2 [kNm]	E3 [kNm]	E4 [kNm]
7	21	0	0	0	0	0
6	18	382	536	899	241	182
5	15	1146	1628	2637	777	520
4	12	2284	3313	5189	1621	989
3	9	3785	5635	8541	2772	1565
2	6	5630	8656	12650	4246	2227
1	3	7791	12464	17441	6068	2953
0	0	10236	17159	22855	8236	3729

Tabell D.14: Moment, M_y , i bjälklagsnivå på alla stabiliserande enheter (E) för vind längs kortsidan (x-led) med med höjd beräknad från underkant stabiliserande enhet.

ekvation 3.15 $M_0 = Q_{y,1} * h_1 + .. + Q_{y,n-1} * h_{n-1}$						
Vån.	H [m]	E0 [kNm]	E1 [kNm]	E2 [kNm]	E3 [kNm]	E4 [kNm]
7	21	0	0	0	0	0
6	18	-19	197	423	690	5
5	15	-57	583	1271	2083	12
4	12	-110	1147	2545	4188	18
3	9	-175	1878	4244	7014	24
2	6	-246	2763	6350	10583	30
1	3	-318	3800	8820	14950	38
0	0	-388	5038	11841	20123	50



Figur D.4: Moment i botten av skjuvväggar i y-led på stabiliserande enhet 1 i teliahuset

Tabell D.15: Momment, och horisontallast som verkar på fundament fördelat per enhet med vind i Y-led. Tabellvärden från D.14

Enhet [m]	Moment [kNm]	Q _y [kN/vån]	Momentandel [%]
0	10236	116	16
1	17159	224	28
2	22855	258	37
3	8236	103	13
4	3729	37	6
TOTAL	62215	738	100

Tabell D.16: Momment och horisontallast som verkar på fundament fördelat per enhet med vind i X-led.

Enhet [m]	Moment [kNm]	Q _x [kN/vån]	Momentandel [%]
0	-388	-3	-1
1	5038	59	14
2	11841	144	32
3	20123	246	55
4	50	1	0
TOTAL	36663	446	100