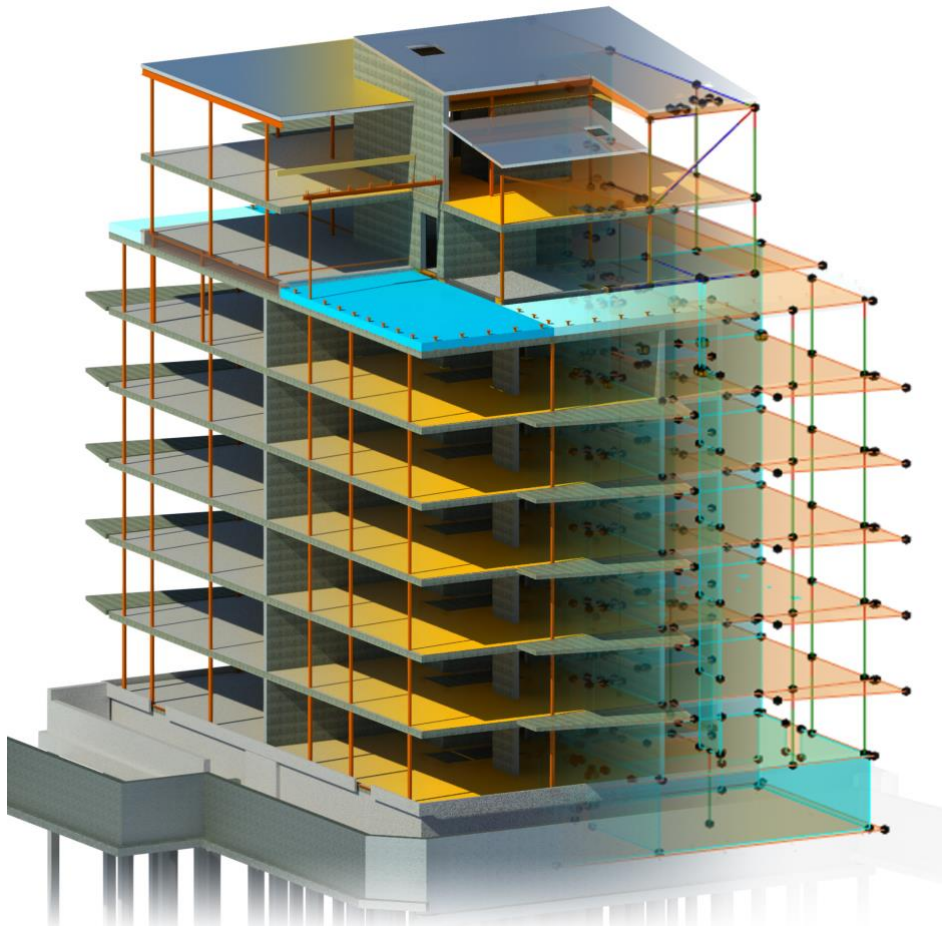




CHALMERS



En analys av arbetsflödet för 3D-armering mellan Revit och Robot

Automation med Dynamo och Sofistik

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Samhällsbyggnadsteknik

DENIS HUJDUR
JOAKIM KARLSSON

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK
AVDELNINGEN FÖR CONSTRUCTION MANAGEMENT

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, 2020
www.chalmers.se

EXAMENSARBETE ACEX20

En analys av arbetsflödet för 3D-armering mellan Revit och Robot

Automation med Dynamo och Sofistik

DENIS HUJDUR

JOAKIM KARLSSON



CHALMERS

En analys av arbetsflödet för 3D-armering mellan Revit och Robot

Automation med Dynamo och Sofistik

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

DENIS HUJDUR

JOAKIM KARLSSON

© DENIS HUJDUR & JOAKIM KARLSSON 2020

Examensarbete ACEX20

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Chalmers tekniska högskola 2020

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för Construction Management

Chalmers tekniska högskola

412 96 Göteborg

Telefon: 031-772 10 00

Omslag:

Illustration av produktionsmodell och analysmodell.

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Göteborg 2020

En analys av arbetsflödet för 3D-armering mellan Revit och Robot

Automation med Dynamo och Sofistik

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Samhällsbyggnadsteknik*

DENIS HUJDUR

JOAKIM KARLSSON

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för Construction Management
Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

Building Information Modeling (BIM) blir ett vanligare arbetssätt inom byggbranschen. Det innebär att fler anpassade programvaror utvecklas för att kunna implementera det här arbetssättet. Däribland Autodesk Robot Structural Analysis och Autodesk Revit vilka är två programvaror för analys respektive modellering. Bakgrunden till examensarbetet är att konsultföretaget VBK har intresse att undersöka kopplingen mellan dessa två programvaror gällande armering för effektivisering av projekteringsprocessen.

Först utförs en litteraturstudie av projekteringsprocessen och en intervju med en ritingenjör på VBK för att få insikt i hur det går till i praktiken och hur 3D-armering används idag.

För att utreda det här studeras överföring av enskilda balkar, pelare och golv mellan programmen och dimensionering av armeringsmängd utförs i Robot för att sedan överföras tillbaka till Revit. Dimensioneringen av en enskild balk kontrolleras med en beräkning förhand som sedan jämförs mot Robots beräkning. I undersökningen används ett referensprojekt för att kunna jämföras mot ett verkligt resultat. Då funktionaliteten för överföring av armering för golv inte är fullt fungerande används insticksprogram som Dynamo och Sofistik för att kunna lösa problemet.

Undersökningen visar på brister i kopplingen mellan programmen i form av att programmen har olika geometriska tolkningar vilket leder till att armeringen blir felaktigt placerad. En kod i Dynamo har tagits fram för att skapa armering för plattor i Revit utifrån en beräkningsrapport från Robot. Insticksprogrammet Sofistik används för att generera armering i Revit utifrån överförda analysresultat från Robot. En brist som finns är att Robot använder beräkningsnormen EKS8 vilket är fyra versioner äldre än EKS11 som gäller idag samt att Sofistik använder sig utav tyska beräkningsnormer.

Det här innebär att överföringen av 3D-armering mellan Revit och Robot i dagsläget inte är särskilt praktiskt i projekteringsprocessen då bristerna som finns är av för stor natur.

Nyckelord: BIM, projekteringsprocessen, revit, robot, dynamo, sofistik

An analysis of the workflow for 3D-reinforcement between Revit and Robot

Automation with Dynamo and Sofistik

*Degree Project in the Engineering Programme
Civil and Environmental Engineering*

DENIS HUJDUR

JOAKIM KARLSSON

Department of Architecture and Civil Engineering
Division of Construction Management
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

Building Information Modeling (BIM) is becoming a more common way of working in the construction industry. This means that more custom software is being developed to implement this work method. These include Autodesk Robot Structural Analysis and Autodesk Revit, which are two software for analysis and modeling. The background to the degree project is that the consulting company VBK has an interest in investigating the link between these two programs regarding reinforcement for a more efficient design process.

First, a literature study of the design process and an interview with a BIM-engineer at VBK is conducted to gain insight into how it works in practice and how 3D reinforcement is used today.

To investigate this, the transfer of individual beams, pillars and floors between the programs and the dimensioning of reinforcement amount is studied in Robot and then transferred back to Revit. The dimensioning of an individual beam is checked with a hand calculation which is compared with Robot's calculation. In this study a reference project is used to compare against a real result. Since the floor transferring functionality is not fully functional, plug-ins like Dynamo and Sofistik are used to solve this problem.

The study shows shortcomings in the connection between the programs in that the programs have different geometrical interpretations, which leads to the reinforcement being placed incorrectly. A script in Dynamo has been developed to create reinforcement for floors in Revit based on a calculation note in Robot. The plugin program Sofistik can be used to generate reinforcement in Revit based on transferred analysis results from Robot. One shortcoming that exists is that Robot uses the calculation standard EKS8, which is four versions older than EKS11 that currently apply.

This means that the connection for 3D reinforcement between Revit and Robot at present is not very practical in the design process as the deficiencies that exist are too large.

Key words: BIM, design process, revit, robot, dynamo, sofistik

Innehåll

SAMMANFATTNING	I
ABSTRACT	II
INNEHÅLL	III
FÖRORD	V
BETECKNINGAR	VI
1 INLEDNING	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte och frågeställningar	1
1.3 Avgränsning	1
1.4 Metod	2
2 TEORETISK BAKGRUND	3
2.1 Tidigare arbeten	3
2.2 Projekteringsprocessen	3
2.2.1 Byggprocessen	3
2.2.2 Projekteringsprocessen i teorin	4
2.2.3 Projekteringsprocessen i praktiken hos VBK	5
2.3 BIM	8
2.4 Eurokoder och föreskrifter	8
2.5 FEM	9
2.6 Introduktion av Programvaror	9
2.6.1 Autodesk Revit	10
2.6.2 Autodesk Robot Structural Analysis Professional	10
2.6.3 Dynamo	10
2.6.4 SOFiSTiK	11
2.7 Kopplingen mellan programvarorna	11
2.7.1 Kopplingen mellan Revit och Robot	12
2.7.2 Kopplingen mellan Revit och Dynamo	13
2.8 Analysmodell i Revit	15
3 KAPITEL TRE - FALLSTUDIER	16
3.1 Armering av balk i Robot	16
3.1.1 Handberäknad verifiering av böj-armering i ULS	20
3.1.2 Balkens beräkningar i Robot	20
3.2 Armering av pelare i Robot	20
3.3 Armering av platta i Robot	22
3.3.1 Generering av armering med SoFiStiK	25
3.3.2 Överföring av Robot resultat med Dynamo	26
CHALMERS, Arkitektur och samhällsbyggnadsteknik, Examensarbete ACEX20	III

3.4	Armering av pelare-balk i Robot	29
3.5	Referensprojekt Kongahälla 5:2	31
4	RESULTAT	39
4.1	Likheter och skillnader mellan Robot och handberäkning	39
4.2	Överföring av 3D-armering från Robot till Revit	40
4.3	Förenkling med hjälp av Dynamo	41
4.3.1	Begränsningar	41
5	DISKUSSION	42
5.1	Krav på modeller	43
5.2	Förslag på framtida studier	43
6	SLUTSATS	45
7	REFERENSER	46
8	BILAGOR	
	Bilaga 1 – Beräkningsgång för balk	
	Bilaga 2 – Beräkningsrapport från Robot	
	Bilaga 3 – Dynamo script för golvarmering	
	Bilaga 4 – Modifierad nod-kod	

Förord

Detta examensarbetet är skrivet på högskoleingenjörsutbildningen inom Samhällsbyggnadsteknik vid Chalmers Tekniska Högskola och omfattar 15 högskolepoäng. Arbetet inleddes i januari 2020 i samarbete med VBK i Göteborg och avslutades i maj 2020.

Vi vill tacka vår handledare och examinerator Mikael Johanson för goda råd och stöd samt hans gedigna intresse i ämnet. Vi vill också passa på att tacka Rasmus Öberg på VBK för handledningen som han tar bidragit med och möjligheten att tillhandahålla kontorsplats i en inspirerande miljö. Ett stort tack går också till Pawel på Autodesk för god hjälp under projektets tid.

Göteborg, Juni 2020
Denis Hujdur
Joakim Karlsson

Beteckningar

2D	Tvådimensionellt
3D	Tredimensionellt
4D	Fyrdimensionellt
5D	Femdimensionellt
AEC	Architecture, Engineering, Construction
API	Application programming interface
BBR	Boverkets byggregler
BIM	Building Information Modeling
CAD	Computer Aided design
Cut length	Det effektiva avståndet mellan stöden och konstruktionstelementet
EKS	Europeiska konstruktionsregler
FEM	Finita element metoden
IFC	Industry Foundation Classes
LOD	Level of Detail

RSAL	Robot Structural Analysis Link
SLS	Service limit state (Bruksgränstillstånd)
ULS	Ultimate limit state (Brottgränstillstånd)
VVS	Värme, ventilation och sanitet

1 Inledning

I det här kapitlet presenteras arbetets bakgrund, tidigare forskning, rapportens syfte, frågeställningar och avgränsningar som har gjorts samt de metoder som använts under arbetet.

1.1 Bakgrund

BIM är ett allt mer vanligt arbetssätt i branschen. Med det finns det möjligheter att gestalta och visualisera byggnader och konstruktioner. Två program som är utgivna av Autodesk är vanliga att använda i branschen, ritprogrammet Revit och beräkningsprogrammet Robot. Arbetsflödet mellan dessa program är idag delvis utforskat och dagens arbetsflöde tillåter inte särskilt mycket optimeringar och ändringar. Större ändringar innebär att konstruktören måste räkna om olika saker som till exempel lasteffekter och armeringsmängder. Det här kan leda till att enbart en eller ett fåtal lösningar presenteras. Med ett förbättrat arbetsflöde är det möjligt att optimera konstruktioner och pröva nya lösningar vilket kan leda till en utveckling av branschen.

En utredning av tidigare examensarbeten har genomförts för att utreda om samma eller liknande undersökningar har gjorts tidigare. Det finns tidigare arbeten som har undersökt exportering av armering från Robot till Revit men utan hjälp av insticksprogram. Eftersom tidigare arbeten är över fem år gamla finns det relevans att undersöka om programvarorna har utvecklats.

1.2 Syfte och frågeställningar

Examensarbetet handlar om hur kopplingen mellan Revit som modelleringsprogram och Robot som beräkningsprogram fungerar med hjälp av två insticksprogram som heter Dynamo och Sofistik. Syftet med examensarbetet är att undersöka och utveckla arbetsflödet mellan beräkning och redovisning av armering med hjälp av dessa programvaror.

För att besvara syftet med arbetet har följande frågeställningar formulerats.

- Vad finns det för begränsningar mellan Revit och Robot?
- Går det att förenkla arbetsflödet med hjälp av Dynamo/Sofistik?
- Vad finns det för begränsning mellan Dynamo och Revit/Robot?
- Hur väl fungerar 3D-armering i projektering?

1.3 Avgränsning

Undersökningarna kommer att begränsas till enskilda element samt kopplingen mellan balk och pelare. Fokus kommer att kretsa kring strukturanalysprogramet Robot Structural Analysis och ritprogrammet Revit som båda är produkter från Autodesk, andra beräkningsprogram används inte då syftet är att undersöka den inbyggda länken mellan programmen.

Undersökningen kommer enbart innefatta huskonstruktioner och betongelement.

Undersökningen kommer begränsas med programvarorna Autodesk Revit 2020, Autodesk Robot Structural Analysis 2020 samt insticksprogrammen Dynamo och SoFiStiK. Motiveringen bakom denna avgränsningen är att dessa program används på VBK för samma ingenjörsmässiga syften som vår undersökning handlar om.

Under arbetets gång kommer olika paket från tredjepartsbibliotek i Dynamo att användas för att kunna skapa mer specifika och avancerade arbetsflöden. Avgränsningen till tredjepartsbibliotek kommer att begränsas till de allra vanligaste tredjepartsbiblioteken som återfinns på topplistan av använda bibliotek, då dessa blir kontinuerligt uppdaterade.

Tabell 1. Tabellen beskriver de olika programvaror som används och dess version.

Programvara	Programvaruversion
Autodesk Robot Structural Analysis 2020	2020.2
Autodesk Revit Structure 2020.2	20191031_1115(x64)
Dynamo Revit	2.3.0.6270
Paket: Clockwork	2.3.0
Paket: Dynamo for Rebar	2.0.2
Paket: BIM4Struc	1.3.0
SOFiSTiK Reinforcement Generation 2020	2.0.269

1.4 Metod

Information om den teoretiska projekteringsprocessen inhämtas via litteraturstudier. För att få ett praktiskt perspektiv på projekteringsprocessen och i synnerhet modellering kommer det att genomföras en intervju med Rasmus Öberg som arbetar som redovisningsingenjör på VBK. Den tekniska bakgrunden till hur programvarorna fungerar inhämtas genom en litteraturstudie som främst består av dokumentation från Autodesk. I syfte att utreda programvarornas koppling kommer en rad olika fallstudier att genomföras.

Analysen kommer att genomföras på enskilda betongbalkar, betongpelare och betongplattor. Sedan analyseras ett pelare-balk system, för att till slut genomföra samma analys för ett referensprojekt där färdiga resultat finns att jämföra mot. För att förstå de olika funktionerna i programvarorna kontaktas support på Autodesk samt inlägg på det officiella Autodesk forumet. För att kunna verifiera beräkningsresultat i beräkningsprogrammet kommer den enskilda balken också att beräknas förhand i Mathcad.

Då en direkt överföring inte är möjlig kommer insticksprogram som Dynamo och Sofistik att användas. I Dynamo kommer tredjepartsbibliotek att användas, då de ofta innehåller noder som är till för specifika ändamål. Med hjälp av dessa går det att skapa mer avancerade arbetsflöden.

2 Teoretisk bakgrund

Under det här kapitlet beskrivs den teoretiska bakgrunden, hur projekteringsprocessen går till i praktiken på VBK och ett antal grundläggande begrepp som är nödvändiga att känna till för rapportens helhet.

2.1 Tidigare arbeten

I ett examensarbete publicerat 2015 av Chalmers tekniska högskola med namnet "Användning av Robot Structural Analysis tillsammans med Revit Structure" undersöktes möjligheten att använda strukturanalysverktyget Robot Structural Analysis för brokonstruktioner för att på ett effektivt sätt kunna återkoppla resultatet till en 3D-modell i Revit Structure. En del av undersökningen visade att exportering av armering från Robot till Revit Structure inte var möjligt för plattor.

Ett mastersarbete som publicerades 2011 av Lunds Universitet med namnet "BIM för analys och dimensionering" undersökte delvis hur exportering av element fungerar från Robot till Revit. Resultaten visade att överföring av armering för balkar och pelare gick att utföra men att det inte fungerade för bjälklag.

2.2 Projekteringsprocessen

I det här avsnittet ges en beskrivning av projekteringsprocessen. Det är den del av byggprocessen när olika discipliner arbetar tillsammans för att skapa en byggnad som uppfyller byggherrens önskemål och krav enligt byggnadsprogrammet. Byggnaden ska också redovisas på ritningar och beskrivningar. Handlingarna som tas fram ska sedan kunna användas som underlag för de som uppför byggnaden (Nordstrand, 2007).

Kapitlet avslutas med resultatet av intervjun som genomfördes med Rasmus Öberg på VBK.

2.2.1 Byggprocessen

Enligt plan- och bygglagen (SFS:2010:900) krävs ett bygglov för att uppföra nya byggnader eller göra ändringar i befintliga byggnader. Bygglov beviljas av kommunens byggnadsnämnd. Innan byggprocessen kan påbörjas måste ett bygglov bli beviljat, först då kan byggprocessen ta vid. I byggprocessen finns det fyra primära skeden, vilka är, programskede, projekteringsskede, byggskede och förvaltningsskede.

I programskedet, också kallat förstudie, genomförs en behovsutredning för förändringen av den planerade verksamheten. Ifall det går att bygga om, eller om det finns behov av nybyggnad (Nordstrand, 2007). Det förbereds alltså handlingar för projektet som skall vara det grundläggande besluten, det kan röra sig om byggnadens storlek, utformning och anpassning till verksamhet. Förutom det som rör själva byggnaden genomförs också geotekniska undersökningar, utmaningar kring miljöfrågor, brandaspekter diskuteras också. Resultatet av alla utredningar sammanställs till slut i ett byggnadsprogram (Nordstrand, 2007).

Nästa steg är produktbestämningen, också kallat projekteringsskede. Det innefattar allt som leder fram till att bygganden uppfyller de önskemål och krav som finns redovisade i byggnadsprogrammet. Projekteringshandlingarna skall sedan användas som underlag under byggskedet. Under projekteringsprocessen är det många olika konsulter inom olika discipliner som arbetar med varandra, t.ex. arkitekter, byggnadskonstruktörer, vvs-ingenjörer och elektriker. En informationsspridning mellan vad de olika konsulterna jobbar på är därför viktigt för att undvika kollisioner och byggfel (Nordstrand, 2007).

Innan byggskedet kan ta fart sker en upphandling av vilken entreprenadform aktörerna skall använda sig av. När byggherren och byggentreprenören är överens kan produktionen börja. I produktionen används informationen från bygghandlingarna som underlag genom hela projektets gång. Val av entreprenadform påverkar även projekteringen. I en utförandeentreprenad är det byggherren som projekterar till bygghandling med hjälp av konsulter. I en totalentreprenad är det däremot entreprenören som projekterar till bygghandlingen.

När byggprocessen är utförd genomförs en kontrollbesiktning innan byggnaden kan tas i drift. Här överläts också dokument och bygghandlingar som används som underlag i förvaltningsskedet av byggnaden. Förvaltningen delas traditionellt sett upp i drift och underhåll. Där vatten, elektricitet, uppvärmning och ventilation är *drift* och reparation och utbyte av komponenter samt underhållsåtgärder är *underhåll* (Nordstrand, 2007).

2.2.2 Projekteringsprocessen i teorin

Projekteringsprocessen är en komplex process som ofta delas in i tre olika skeden enligt Figur 1.



Figur 1: Projekteringsprocessens olika skeden.

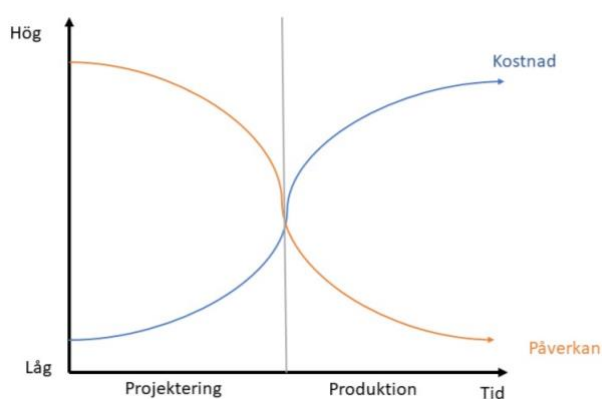
Det initiala skedet består av gestaltning där målet är att komma fram till ett huvudalternativ som sedan utvecklas mer i detalj. I gestaltningen är det arkitekten som har huvudansvaret, tillsammans med arkitekten jobbar även konstruktören och övriga projektörer att den bärande konstruktionen och övriga installationer passar ihop med arkitektens förslag. Planlösningar är en omfattande uppgift där strävan är att uppfylla den ändamålsenliga utformningen i plan och höjd, men att byggnadsvolymen samtidigt blir maximalt utnyttjad (Nordstrand, 2007). Då gestaltningen väger olika alternativ och lösningar mot varandra är implementationen av BIM ett kraftfullt hjälpmedel att komma fram till en lösning och ett huvudalternativ.

I systemutformningen skall byggnadens konstruktionssystem och olika installationssystemen fastställas, så att de olika kraven i byggnadsprogrammet uppfylls. Under hela systemutformningen måste handlingarna kontrolleras för

att kraven i BBR, projektets miljöplan samt arbetsmiljön på arbetsplatsen ska uppfyllas. I systemutformningen bör ljud och brandkrav fastställas innan detaljprojekteringen kan påbörjas. Målet med systemutformningen är att produktbestämningen skall vara klar och att endast detaljprojektering skall återstå. Utifrån ett ekonomiskt perspektiv hjälper det även till att göra en kostnadsbedömning. (Nordstrand, 2007).

Detaljprojekteringen är det mest omfattande i projekteringsskedet då det till slut ska mynna ut i bygghandlingarna som skall användas för att genomföra byggnationen. Här dimensioneras samtliga byggnadskonstruktioner och installationskomponenter. Enligt miljöplanen har varje projektör ett ansvar att miljögranska sitt byggnadsmaterial där målet är att välja material som är resurssnåla och medför låg miljöbelastning.

Med hjälp av BIM (se avsnitt 2.3), finns det möjligheter att tidigt upptäcka fel i projekteringen till exempel kollisioner mellan olika discipliner och fel i mängdavtagning. Då kostnaden att ändra något sent i projekten är hög finns det en stor vinst med att redan vid projekteringen upptäcka fel, med hjälp av detta kan det finnas både tidsvinster och pengar att spara. Detta illustreras i Figur 2.



Figur 2: Kostnad och påverkansgrad vid olika tidsskeden.

2.2.3 Projekteringsprocessen i praktiken hos VBK

För att ta reda på hur projekteringsprocessen fungerar i praktiken har en intervju utförts med Rasmus Öberg som har fem års erfarenhet i branschen. Rasmus roll på VBK är att arbeta som redovisningsingenjör (ritingenjör/BIM-ingenjör) där hans främsta uppgift handlar om att åskådliggöra och redovisa resultaten från beräkningsingenjörerna. Han kontrollerar också att dimensionerna passar in med arkitektens ritningar och koordinerar mot andra discipliner. Det kan exempelvis handla om hur bjälklagskanten är placerad relativt till deras ytterväggar. Det handlar i stort sett om korrigering och samordning med externa källor.

Ritingenjörer använder sig främst utav Revit som modelleringsprogram men AutoCAD kan också förekomma för vissa syften. Ritingenjörer kan ibland göra egna handskisser men det är oftast beräkningsingenjörer som gör snabba och enkla handskisser som används som ett utkast, men i mindre uppdrag kan det

också bli slutprodukten. I tidiga skeden ritar de exempelvis in vart pelare och balkar ska placeras. Revit är det vanligaste programmet för nybyggnationer och det börjar bli vanligare för ombyggnationer också. I och med att de också arbetar med ombyggnationer finns det ofta äldre AutoCAD-material tillgängligt vilket innebär att en ny modell inte alltid modelleras upp, då det kostar tid och pengar som slutkunden inte alltid tycker är värt. Istället anpassas ofta befintliga modeller som redan finns. De jobbar också med Tekla men då främst för tillverkningsritningar av antingen stål eller prefabricerad betong. Det behandlar ofta den högsta detaljeringsgraden LOD400 och då ska allting stämma eftersom det handlar om prefabricerade element där ändringar på plats kostar både tid och pengar, exempelvis exakt placering av fönster, håltagning och placering av el-dosor.

VBK anlitas främst som generalkonstruktörer, deras huvudsakliga uppgift är att utforma stommen tillsammans med allmänna konstruktionsritningar och är då ofta med från programskedet till systemhandling men kan egentligen bli anlitade i vilket steg som helst. Ibland gör de också prefabricerade projekt, det innebär att de kommer in senare i processen när någon redan har räknat och ger dem ett lastunderlag där deras uppgift då är att framställa tillverkningsritningar. I systemhandlingen ska de ha framställt något som ska fungera. Här finns bara en ungefärlig kostnadsuppskattning som kan ge en någorlunda bra bild på kostnaden för projektet men fokus är främst att ta fram dimensioner och mängder. Därefter går de vidare med ett förfrågningsunderlag som någon ska kunna lämna ett anbud på för att sedan kunna gå vidare men en bygghandling. Då måste det vara säkerställt att allting är byggbart och uppfyller sina funktioner på ett bra sätt.

Ofta läggs bygghandlings-delen ut för anbud vilket gör att någon annan aktör kan ta vid. Det kan också hända att samma personer på VBK får lov att utforma bygghandlingarna och då stannar projektet inom företaget. Ibland har VBK enbart hand om bygghandlingarna vilket gör att beräkningar och dimensionering utav stommen till stor del redan är färdig men att det istället läggs fokus på till exempel kopplingar, detaljer och förankringar.

Vid ett helt nytt projekt handlar det om att läsa in sig på projektet och förstå arkitektens ritningar. I början av projektet kan ritingenjören börja med att diskutera med andra om vad som behöver redovisas och vad för typ av konstruktion som ska göras oavsett om projektet befinner sig i programhandling, systemhandling eller bygghandling. Därefter börjar ritingenjören rita upp något preliminärt för att kunna visa ungefär hur det kommer att se ut. Om ritingenjören däremot kommer in senare i projekteringsskedet kommer hen oftast in då korrigeringar och ändringar skall ske, till exempel ändringar av dimensioner.

Ritingenjören kan också komma in när bygghandlingen ska göras. Då behöver allting ritas och redovisas i mycket större detalj. Med hjälp av kunskap och erfarenhet från tidigare projekt kan ritingenjören också göra egna antaganden eller överslagsberäkningar utifrån det som har efterfrågats. Beräkningsingenjörerna kan sedan verifiera om det är korrekt utfört. Om det

handlar om större och viktigare konstruktionsaspekter diskuterar ritingenjören först med beräkningsingenjörerna om hur det skulle kunna lösas för att säkerställa olika lösningar.

Arbetsprocessen börjar med att en produktionsmodell och en beräkningsmodell (FEM-modell, se kap 2.4) skapas parallellt där beräkningsmodellen används av beräkningsingenjörerna för att dels kontrollera lastnedräkning, stabilitet och lasteffekter på de olika konstruktionsdelarna. Utifrån beräkningsmodellen går det då att få ett mer detaljerat underlag som t.ex. en beräkningsrapport som kan behövas för en extern granskning eller verifiering av olika antaganden. Det kan därför ibland hända att FEM-modellen skiljer sig från produktionsmodellen, just för att den skall vara mer beräkningsvänlig. I och med att det inte går att jobba på samma element samtidigt offras därför analysmodellen i Revit och en separat beräkningsmodell modelleras istället upp. Nackdelen med två separata modeller är att båda modellerna måste uppdateras med samma ändring om någonting ändras vilket medför dubbelarbete samt risken att det som beräknas och ritas inte stämmer överens. I och med externa granskningar, ändringar i projekt och nya underlag är arbetsprocessen iterativ med att behöva räkna om, rita in och granska. Därför kan stora ändringar sent i processen ta långt tid att ändra och därmed även få en ekonomisk konsekvens.

Det genomförs ofta försök att optimera konstruktionen genom att pröva alternativa lösningar om idéer uppkommer, i små projekt med mindre tidsramar finns inte alltid den tiden som krävs för att fullständigt optimera en konstruktion varpå en tidig konstruktionslösning blir den slutgiltiga. I större projekt med mer tidsutrymme kan det finnas mycket pengar att spara genom att optimera konstruktionen och därmed planeras det in tid att pröva olika lösningar då det i slutändan blir ekonomiskt värt det, men också värt det miljömässigt med mindre resursanvändning.

Då många konstruktioner består av någon typ av betongkonstruktion är armering en aspekt att diskutera, sällan finns det krav på att modellen skall innehålla 3D-armering då det kan ta längre tid än vad det är värt, därför ritas armeringen in förhand på 2D-ritningar istället.

Problemet i dagsläget är att när armeringen ritas in förhand i 2D måste ritingenjören komma ihåg att göra ändringar i alla olika snitt där armeringen skär, annars kommer ritningarna inte att stämma överens. Fördelen med 3D-armering är att det ändras automatiskt dvs att en modifiering i ett specifikt område kommer medföra en förändring på alla andra områden som förknippas med den korrigerade biten. Det minimerar dessutom antalet fel samt att det blir svårare att "fuska" med armeringen då den ger en faktiskt visuell representation om hur det kommer se ut. En annan fördel är också att det går att få ut en armeringsspecifikation från det som är modellerat, jämfört med snitt i 2D där en konsult måste anlitas för att bestämma mängder och längder på alla järn samt vart alla järn skall placeras.

Samordningen med andra discipliner är på väg att bli mer organiserat än tidigare. I projekt finns det ofta krav på IFC leveranser t.ex. varje vecka där en extern aktör, vanligtvis en BIM-samordnare, genomför en krockkontroll i ett

program där flera discipliners filer läggs samman och därefter får varje roll en återkoppling om vad som eventuellt behöver korrigeras. I större projekt sker samgranskningen ofta varje vecka medan i mindre projekt sker det en samgranskning mer mot slutet av projektet än kontinuerligt under tiden.

I många projekt är det ofta uppdelat mellan de som räknar och ritar, detta för att båda delarna kräver stor kompetens och tid inom sitt specifika område och det är därför lätt att nischa sig mot antingen beräkning eller redovisning. Vid mindre projekt är det möjligt att jobba med både redovisning och beräkning men vanligast är att ha en specialistroll inom sitt område.

2.3 BIM

BIM, byggnadsinformationsmodell, eller byggnadsinformationsmodellering är två definitioner på BIM. Det är inte bara en teknologi, utan ett arbetssätt. BIM handlar om att skapa digitala modeller av byggnadsverk. Modellen som skapas kallas för byggnadsinformationsmodell och arbetssättet kallas för byggnadsinformationsmodellering. I BIM är det bokstaven "I" som är det viktiga, information. En modell som innehåller information är mycket användbar genom hela processen, från ritbordet till färdig konstruktion och förvaltningsskede. Genom att använda BIM uppstår mindre antal fel vilket resulterar i bättre kvalitet på byggnaderna, effektivare projekt till en lägre kostnad (Eastman, Teicholz, Sacks, & Liston, 2011).

Antalet fel kan minskas genom att det finns en verklig 3D-modell där kollisioner kan upptäckas i ett tidigt skede. Genom att kunna visualisera byggnadsmiljön mellan olika discipliner blir det en effektivare process som helhet.

Med BIM syftas det oftast på 3D-BIM, alltså en 3D-modell med byggteknisk information. Utöver det finns 4D-bim vilket lägger till tidsaspekten samt 5D-BIM som hanterar kostnadsaspekten (Vilutiene, 2019).

Exempel på attribut som kan förekomma är materialparametrar, ljudklass, brandklass och tillverkare. Allt detta är olika information, beroende på hur detaljerad information som finns tillgänglig finns det olika "*Level of Detail*" (LOD) klasser. Dessa sträcker sig från LOD100 till LOD500, där LOD100 är den mest grundläggande detaljeringsgraden som till exempel innehåller vad det är för typ av objekt. LOD500 är den högsta detaljeringsgraden som innehåller i princip fullständig information som geometri, tillverkare, modell, materialparameterar etcetera.

2.4 Eurokoder och föreskrifter

Eurokoder är en europeisk standard som specificerar hur konstruktioner skall utformas. I lagen om plan och byggförordning (SFS:2011:338) skall en byggnad projekteras och utföras på så sätt att användning och byggnation inte leder till att konstruktionen helt eller delvis rasar, får oacceptabla deformationer, leder till skada på andra delar av byggnaden, eller att skadan är i större proportion än den händelse som orsakat skadan. För att uppfylla detta används beräkningsnormerna i eurokoderna och föreskriften EKS som är boverkets konstruktionsregler för att verifiera bärförmågan i konstruktioner (Boverket,

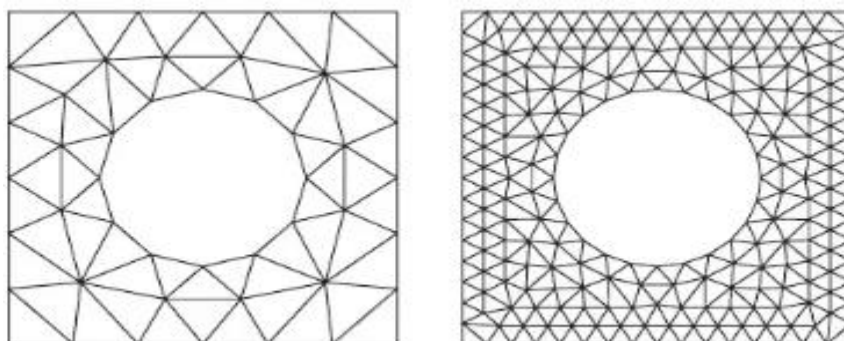
2019). I den svenska bilagan görs nationella val till dagens eurokoder som anpassas till svenska förhållanden. Eurokoderna delas in i olika delar beroende på vad som behandlas. De olika delarna som kommer att refereras till presenteras i Tabell 2 nedan

Tabell 2. De olika eurokoderna och dess användningsområde. (SIS, 2020)

Namn	Område
EN 1990: Eurokod 0	Grundläggande dimensioneringsregler
EN 1991: Eurokod 1	Laster på bärverk
EN 1992: Eurokod 2	Dimensionering av betongkonstruktioner
EN 1993: Eurokod 3	Dimensionering av stålkonstruktioner
EN 1994: Eurokod 4	Dimensionering av stål/betong konstruktioner
EN 1995: Eurokod 5	Dimensionering av träkonstruktioner
EN 1996: Eurokod 6	Dimensionering av murverkskonstruktioner
EN 1997: Eurokod 7	Dimensionering av geokonstruktioner
EN 1998: Eurokod 8	Dimensionering av bärverk m.h.t. jordbävning
EN 1999: Eurokod 9	Dimensionering av aluminiumkonstruktioner

2.5 FEM

Finita elementmetoden, FEM, är en numerisk metod för att lösa matematiska problem. I metoden delas konstruktionen upp i små delar, dvs finita element som även benämns som "mesher", se Figur 3. Detta för att beräkna spänningar, krafter, töjningar och förskjutningar. FEM tillåter alla sorters geometrier då varje element har fyra noder, vilket i sin tur har sex frihetsgrader, tre för förskjutning och tre för vridning. FEM är dock endast en approximativ metod men med tillräcklig noggrannhet i sin beräkningsmodell stämmer den ofta överens med verkligheten. Det här skapar stora matriser som sedan löses med datorkraft. Exempel på FEM-program är Autodesk Robot som idag används av yrkesverksamma konstruktörer för att genomföra avancerade beräkningar.



Figur 3: En mindre noggrann och en mer noggrann finit modell.

2.6 Introduktion av Programvaror

I det här avsnittet introduceras de olika programvarorna och dess insticksprogram. Programvarorna beskrivs utifrån vad dess primära syfte är i helhet samt i arbetet.

2.6.1 Autodesk Revit

Autodesk Revit är ett BIM-baserat program skapat av Autodesk som gör det möjligt för användaren att designa en byggnad, dess struktur och element i 3D med hjälp av olika verktyg (Autodesk, 2020a). Verktygen som används för modellering är utrustade med verkliga egenskaper. Egenskaperna kan bestå av material, hållfasthetsparametrar, byggnadsfysikaliska egenskaper mm. samtidigt som det kan kommunicera med andra program. Det gör det möjligt för ingenjörer att designa en byggnad och dess komponenter i 3D och få tillgång till bygginformation från byggnadsmodellens databas innan det byggs på plats. För att modellen skall gå att beräkna med krävs en korrekt analysmodell som är sammanhängande.

2.6.2 Autodesk Robot Structural Analysis Professional

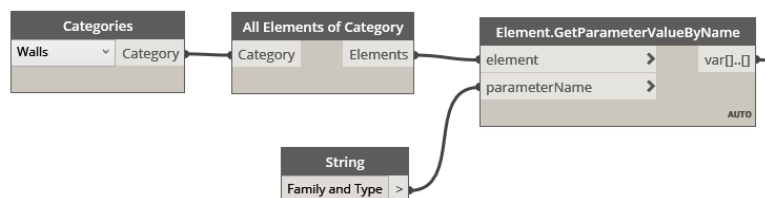
Autodesk Robot Structural Analysis Professional är en programvara från Autodesk som använder BIM-integrerade arbetsflöden för att utbyta data med Revit och ger konstruktörer möjligheten att utföra olika byggsimuleringar, analysfunktioner samt kodbaserad design för stora och komplexa strukturer. I programmet finns det också inbyggda funktioner för generering av armering i betong, samt funktioner för ståldesign, detta utifrån gällande normer (Autodesk, 2020b). I Autodesk Robot 2020 används fortfarande EKS8 vilket är en gammal beräkningsnorm och stödet för nya EKS11 finns det planer på att implementera men inget definitivt datum när det kommer att uppdateras¹.

2.6.3 Dynamo

Dynamo är ett kostnadsfritt open-source grafiskt programmeringsverktyg som breddar arbetsförmågan i Revit genom att ge åtkomst till Revits *Application Programming Interface (API)* på ett tillgängligt sätt. Istället för att skriva kod, skapas program med Dynamo genom att manipulera grafiska element som kallas "noder" som styrs av programmeringsspråket Python (Kilkelly, 2018).

I Dynamo finns färdiga paket med noder men där externa utvecklare kan ladda upp egna paket med skräddarsydda noder.

Flödet i Dynamo läses från vänster till höger (se Figur 4), jämfört med textbaserad programmering som läses i kronologisk ordning uppifrån och ner. Noderna kan från olika inputs generera olika outputs som i sin tur kan användas som inputs till andra noder.



Figur 4: Exempel på arbetsflöde i Dynamo. Här hämtas parametervärdet för "Family and Type" för alla väggar i projektet.

¹ Kontakt med utvecklare på Autodesk via mail 2020-02-13

En stor del av informationshanteringen i Dynamo sker i listor, därför handlar arbetsflödet i stor del om att sortera, filtrera och strukturera listor för ett slutgiltigt ändamål (Autodesk, 2019a).

Större flexibilitet ges genom att vara bekant med programmering då utan större kunskap i programmering är användaren begränsad till det inbyggda biblioteket och noder från externa utvecklare. Med större kunskap inom programmering är det möjligt att skriva egna kodblock med Dynamos egna språk DesignScript eller egen Python kod för ett specifikt ändamål.

2.6.4 SOFiSTiK

Sofistik är ett företag som är auktoriserad partner till Autodesk. De erbjuder fristående FEM-program samt insticksprogram till Autodesk Revit. I SOFiSTiK finns olika beräkningsregler inbyggt, det vill säga att Eurocode är valbart, nationella parametrar finns också att tillgå. Den svenska inställningen som finns för analys är 2019 års svenska annex av Eurocode2.

Med ett inbyggt verktyg "Analytical check" är det möjligt att göra en kontroll av analysmodellen där mjukvaran letar efter ologiska anslutningar och delar som är fria och inte har någon anslutning.

Det finns ett armeringsverktyg som hjälper till med att detaljrita 3D-armering, kallat "reinforcement generation" som kan generera erforderlig armeringsmängd utifrån analysresultat i SOFiSTiKs program FEA (Finite element analysis), som är sparad i databasfilen. SOFiSTiK kan också läsa av det importerade resultatet från Robot för att på samma sätt generera armering utifrån teoretiskt nödvändig. Inställningarna för hur armeringsgenereringen styrs finns i en separat fil där enbart den tyska bilagan till Eurocode finns att tillgå³.

Med hjälp av ett inbyggt kontrollverktyg går det också att kontrollera erforderlig armeringsmängd mot den faktiskt genererade, detta för att se att det inte har blivit något fel i den automatiska genereringen. I detta arbete kommer den inbyggda länken för att generera armering via resultat som är uträknade i Robot att användas (SOFiSTiK AG, 2020).

2.7 Kopplingen mellan programvarorna

I det här avsnittet presenteras kopplingen mellan de olika programvarorna och hur de fungerar sinsemellan.

Den dubbelriktade interoperabilitet mellan Revit och Robot gör det möjligt att utbyta information mellan modellerna. Länken mellan programvarorna gör det därför möjligt att lägga till analysrelaterad information till Revit-modellen för att sedan använda samma modell för analys i Robot och därefter uppdatera modellen i Revit baserat på analysresultaten och eventuella strukturella ändringar. Det hjälper till att reducera den tiden som krävs för korrigering av flera modeller och även undvika fel som följd av manuell samordning.

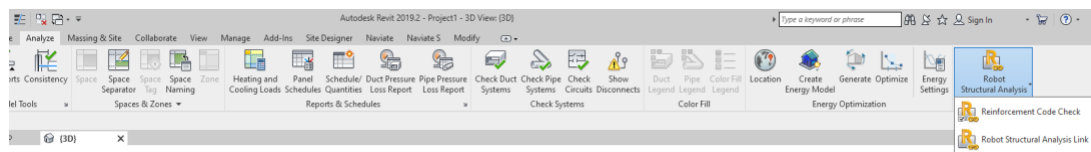
² Kontakt med support på Sofistik via mail 2020-03-25

³ Kontakt med support på Sofistik via mail 2020-03-25

2.7.1 Kopplingen mellan Revit och Robot

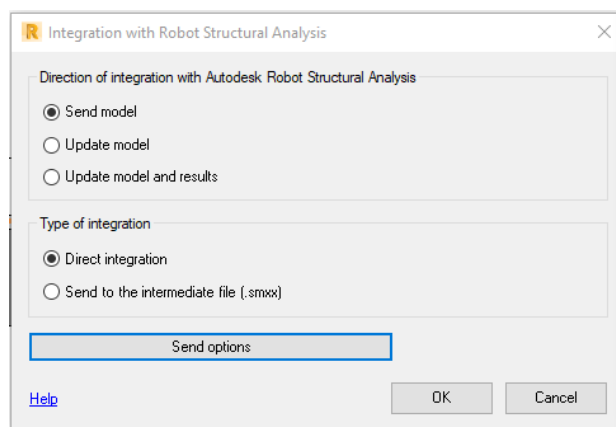
I programmen Revit och Robot finns det en inbyggd koppling som gör att programmen skall kunna interagera med varandra. Denna inbyggda länk tillåter användaren att föra över en hel struktur eller enbart delar av strukturen. Användaren kan också föra över en hel eller delar av en Revit modell för beräkning av nödvändig armeringsmängd i Robot och sedan uppdatera Revit modellen med resultatet (Autodesk, 2018).

Under panelen "Analyze" finns knappen "Robot Structural Analysis link" som är den inbyggda länken mellan Revit och Robot, se Figur 5 nedan.



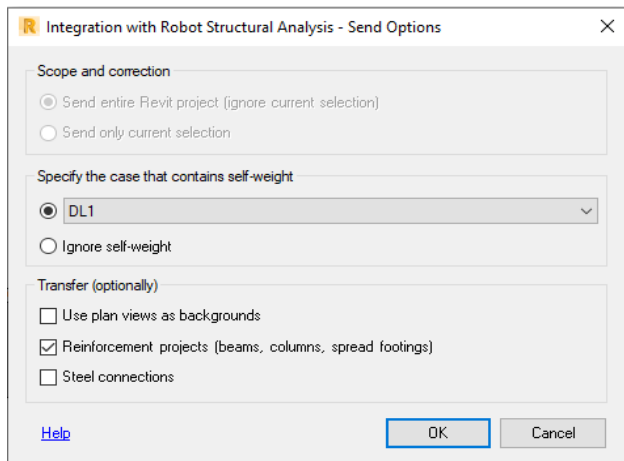
Figur 5: Den inbyggda knappen för integration mellan Revit och Robot.

I rutan finns olika alternativ, det går att skicka en modell, uppdatera en befintlig modell samt att uppdatera en befintlig modell med analysresultat. Uppdateras modellen med resultat överförs analysresultat, det vill säga lasteffekter och information om erforderlig armeringsmängd. Det går också att välja vilken typ av integration, att skicka direkt eller att spara som filformatet ".smxx" för att kunna öppna vid ett senare tillfälle, se Figur 6 nedan.



Figur 6: De olika valalternativen att skicka och uppdatera modeller.

Under knappen "Send options" finns det olika val att göra för vad som skall skickas över. Här går det att bocka i att armering samt ståldetaljer skall skickas över och uppdateras, se Figur 7 nedan.

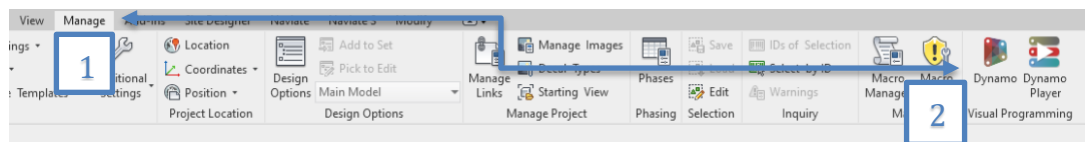


Figur 7: Olika alternativ för vad som ska överföras.

2.7.2 Kopplingen mellan Revit och Dynamo

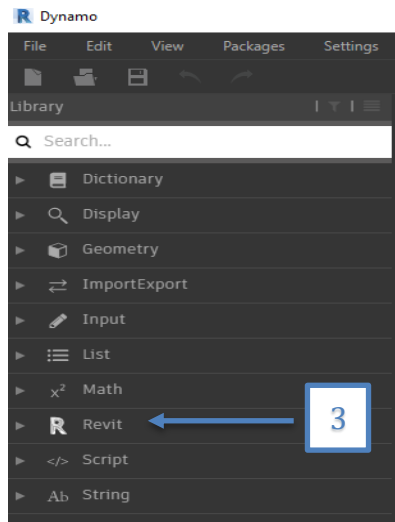
Dynamo erbjuder noder som är speciellt designade för Revit, såväl som tredjepartsbibliotek från privatpersoner och företag (Autodesk, 2020c). Revit styrs med hjälp av Dynamo genom dess *Application Programming Interface (API)*. Det tillåter användaren att utföra kommandon inuti Revit via Dynamo, allt som går att göra i Revit är då möjligt att utföra i Dynamo. Det här möjliggör t.ex. automatisering av repetitiva uppgifter.

För att få åtkomst till Dynamo i ett Revit-projekt finns funktionen under fliken Manage (1) och sedan Dynamo (2) enligt Figur 8 nedan.



Figur 8: Navigering i Revit.

När Dynamo öppnas i Revit finns det en kategori som heter "Revit" (3), se Figur 9. Det är ett tillägg till systemets UI som kommer med noder anpassade för specifika arbetsuppgifter. Dessa olika kategorier klassas som "paket" och är kategoriserade för olika specifika ändamål.



Figur 9: Åtkomst till paket med noder.

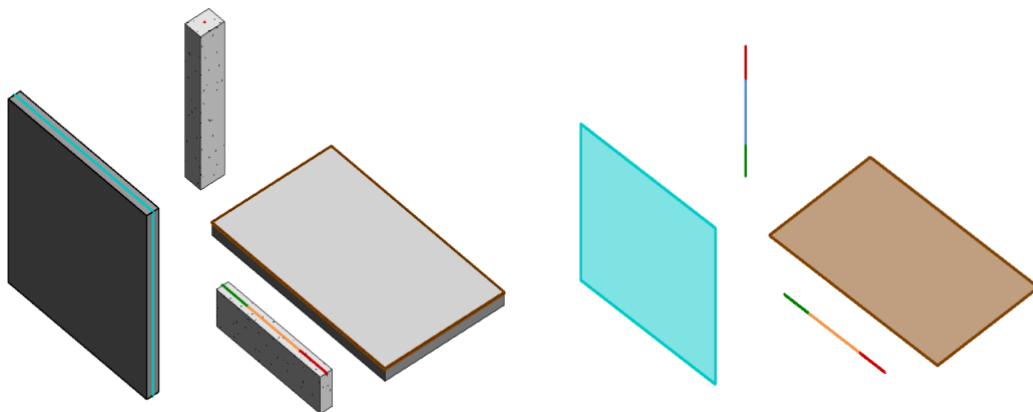
Dynamo är kopplat med filen vilken den startades i Revit. Grafen som skapas i Dynamo kommer därför enbart att göra ändringar den filen som Dynamo är kopplat till.

Dynamo har inga inbyggda enheter internt. När längden på en balk anges som exempelvis "5" kommer den att förbli enhetslös tills informationen skickas utanför Dynamo. Hur ett annat program eller filformat tolkar "5" skiljer sig åt baserat på vilka enheter den använder.

I Revit kommer det värde som har angetts av Dynamo att få den enheten som är inställd för just den parametern i Revit. Om längden på en balk anges som 10 kommer Revit tolka det som 10 meter om längdenheterna är förinställda på meter eller som 10 ft om det är Imperial-enheter. För elementparametrar får värdena de enheterna som krävs för den parametern. Läsvärden från Revit fungerar på samma sätt dvs 5 ft, "5" och 5 kN/m² läses alla av som 5 i Dynamo (Autodesk, u.å.).

2.8 Analysmodell i Revit

För att en modell skall gå att räkna med krävs en korrekt sammanhängande analysmodell. En analysmodell är en simplifierad variant av den fysiska modellen, se Figur 10 nedan där en vägg, balk, pelare och golv exemplifieras. Analysmodellen innehåller de strukturella komponenterna, dess geometrier, materialdata, laster och randvillkor, men dessa representeras av linjer och noder i programmet. Medan den fysiska modellen ritas upp skapas samtidigt en analysmodell i en annan vy (Autodesk, 2019b). Den analytiska modellen kräver ibland manuella justeringar då programmet inte alltid förstår hur olika saker sitter ihop. En komplett och sammanhängande analytisk modell skapar då ett system som går att räkna med. Finns det brister i kopplingarna betraktas elementen som separata vilket kommer ge instabilitetsproblem. För att automatiskt korrigera analysmodellen finns ett paket i Dynamo som heter "Analytical modeling" som kan användas i Revit för att förenkla arbetet. För att geometrin skall kunna representeras av en linje är det viktigt att parametern "cut length" i Revit är densamma i Robot. Det representerar objektets faktiska längd, vid olikheter kommer geometrierna inte stämma mellan de olika programmen och felaktigheter kan uppstå. Det här presenteras med ett exempel i avsnitt 3.4.



Figur 10. Till vänster den fysiska Revit modellen och till höger den analytiska modellen

3 Kapitel tre - Fallstudier

För att kunna undersöka huruvida kopplingen mellan Revit och Robot fungerar kommer det att genomföras olika fallstudier. Dels genom att överföra enskilda enkla element som balkar, pelare och golv. Därefter kommer samma analys för balken att genomföras i ett referensprojekt för att kunna jämföra mot ett verkligt resultat. För att på något sätt enkelt kunna verifiera resultatet i Robot genomförs en handberäkning för den fritt upplagda balken enligt tidigare kursböcker som följer Eurokod 2.

3.1 Armering av balk i Robot

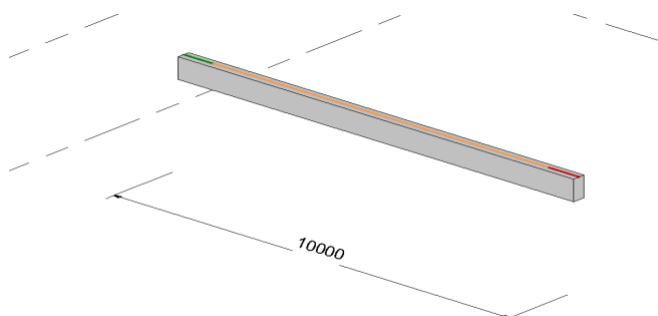
För att kunna undersöka huruvida kopplingen mellan Revit och Robot fungerar kommer en balkstrimla först att ritas upp i Revit, för att sedan överföras till Robot och analyseras med en jämnt utbredd last. Därefter skall armeringsfunktionen i Robot generera en armering, och sedan föras tillbaka till Revit och verifieras att det fungerar och visualiseras korrekt. Indata för balken presenteras i Tabell 2 nedanför.

Balkens uppbyggnad inklusive dess materialegenskaper för undersökningen presenteras i Tabell 2 nedan. Övriga ingångsvärden har ej modifierats.

Tabell 2: Balkens struktur och egenskaper

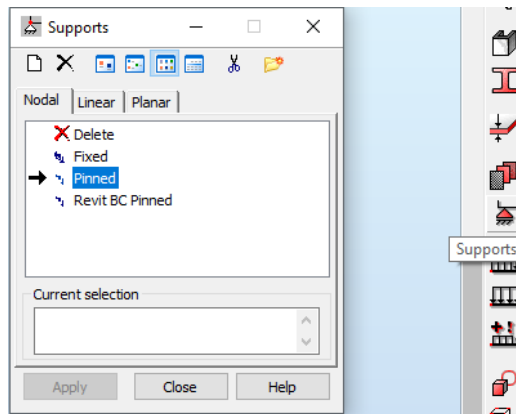
Indata	
Revit-element	Concrete-Rectangular Beam 300 x 600mm
Längd	10 m
Variabel last	6,9 kN/m
Egentyngd	9 kN/m
Exponeringsklass	XS1
Betongklass	C35/45

Med dessa värden är det enkelt att få en intuitiv känsla för vad som är rätt och därmed blir det lättare att upptäcka fel i beräkningsprogrammet. Uppfylls inte kraven enligt Eurocode eller om Robot märker att det inte fungerar kommer felmeddelanden att dyka upp när balken ska dimensioneras. Balken ritas upp i Revit enligt Figur 11.



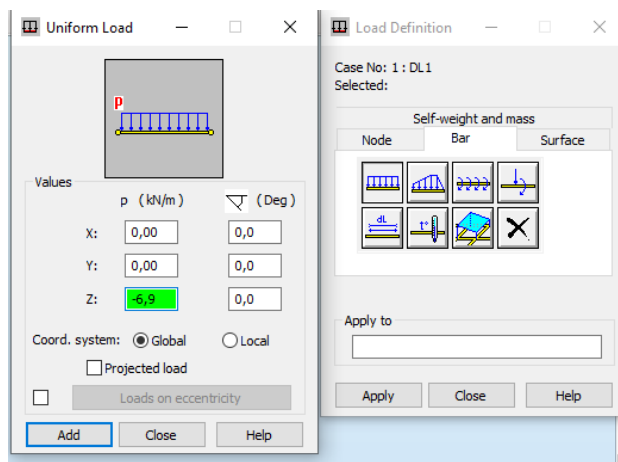
Figur 11: Balkens geometri i Revit.

Därefter överförs balken till Robot med hjälp av den inbyggda funktionen "Structural Analysis Link" och under "Send Options" bockas valet för egentynghet och funktionen "Direct Integration" används. Balken öppnas då som en analytisk linje i Robot. I högerspalten finns det verktyg för att justera upplagsförhållanden samt laster. Upplagsförhållanden väljs till "pinned", dvs. ledad för att balken ska bli fritt upplagd, se Figur 12 nedan.



Figur 12: Inställning av stöd (upplagsförhållanden) i Robot.

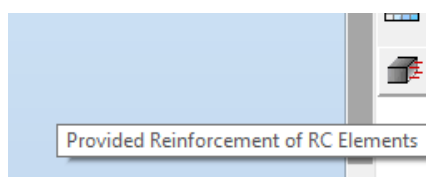
I verktyget "load definitions" kan olika laster appliceras, här väljs en jämnt utbredd last med en storlek av -6.9 kN/m i z-led, se Figur 13.



Figur 13: Applicering av linjelast i Robot.

När upplagsförhållanden och laster är definierade beräknas moment, tvärkraft och övriga spänningar ut under fliken "analysis → calculations".

I högerspalten används sedan verktyget "Provided reinforcement of RC elements" för att beräkna och generera armering, se Figur 14 nedan.



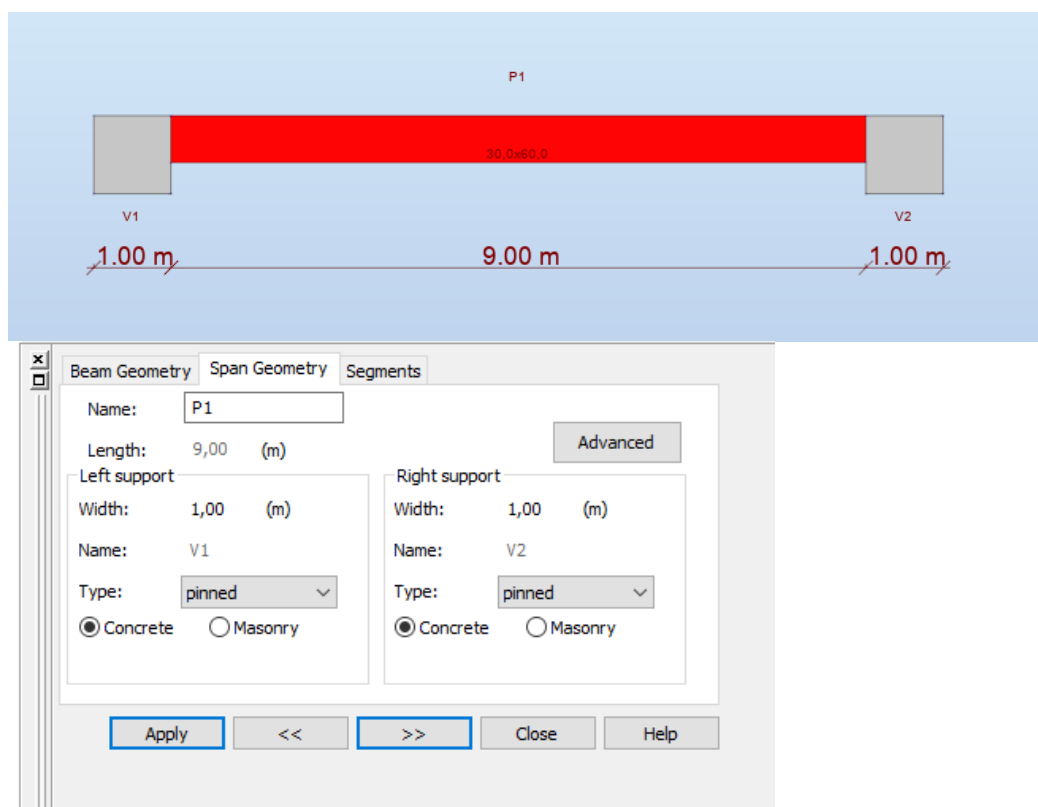
Figur 14: Verktyg för att räkna ut erforderlig armeringsmängd.

Robot vill veta vilka laster den ska ta hänsyn till och för det här fallet tas det bara hänsyn den variabla lasten och egenvikten.

Materialegenskaper som betongklass och exponeringsklass kan justeras efter önskade behov i fliken "Analysis" → "Calculation Options" respektive "Story Parameters". I det här fallet ändras det efter de angivna ingångsvärdena i Tabell 2.

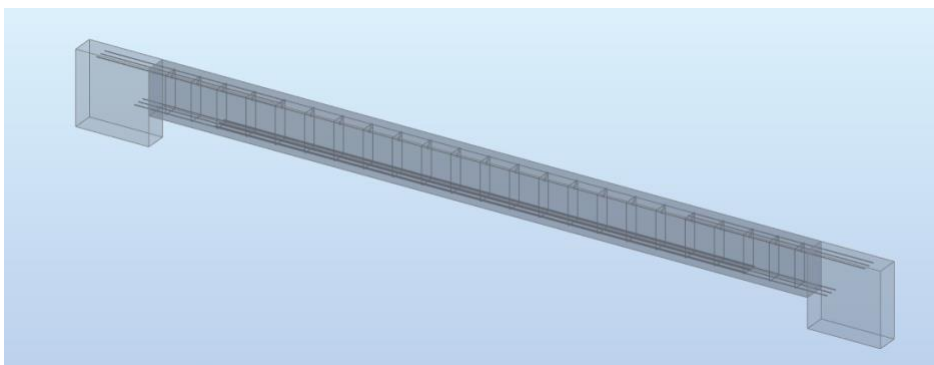
För att kunna generera armering behöver stödets bredd anges, dessa kan inte anges till noll då det inte finns plats för förankring, Robot ger också ett felmeddelande om detta om utrymmet inte räcker till.

För balken anges stödets bredd till en meter vardera. Det här ger i sin tur en effektiv balklängd på nio meter och en totallängd på elva meter, se Figur 15 nedan.



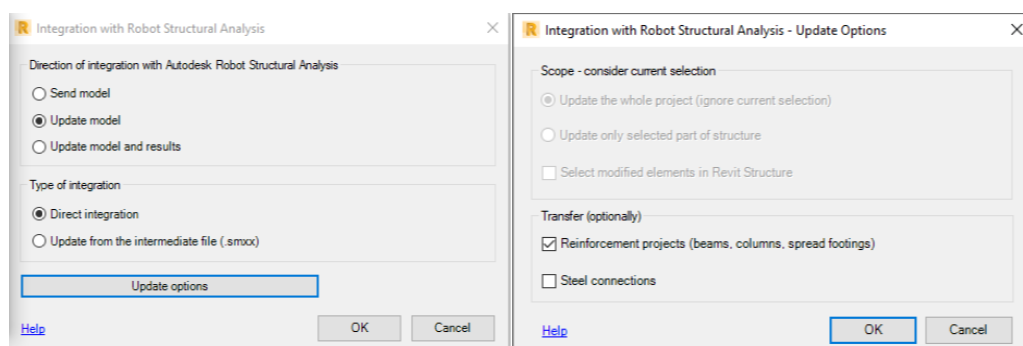
Figur 15: Balkens nya geometrier.

När alla inställningar är klara beräknas och genereras armering via "Start calculations" och därefter visas en 3D-modell av balken med den genererade armeringen under fliken "Beam reinforcement", se Figur 16 nedan. I fliken "Beam note" genereras en automatisk beräkningsrapport där indata och resultat presenteras, det här presenteras i avsnitt 3.1.1.



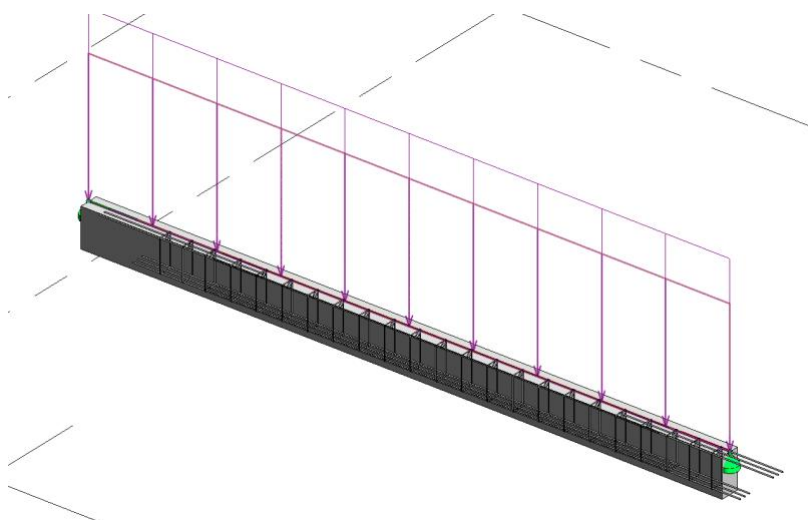
Figur 16: Balken med framräknad och genererad armering.

Därefter uppdateras den befintliga Revit-modellen med den inbyggda länken. Här väljs "Update model" och under "Update options" kryssas rutan för att överföra armering i enligt Figur 17.



Figur 17: Uppdateringsinställningar i Revit.

En lista för arbetsprocessen kommer upp och inget felmeddelande observeras. Hela modellen är nu uppdaterad med resultatet, och armeringen har flyttats över till Revit modellen. Armeringen är dock förskjuten åt höger och är delvis utanför balken som visas i Figur 18 nedan.



Figur 18. Den överförda balken till Revit med tillhörande armering

3.1.1 Handberäknad verifiering av böj-armering i ULS

För att kunna jämföra likheter och skillnader mellan traditionell beräkning och Robot utfördes en beräkning av balkens kapacitet i brottgränstillstånd i Mathcad. Beräkningarna baseras på ekvationer ur boken Bärande Konstruktioner del 1 och 2. Beräkningsgången presenteras i Bilaga 1.

3.1.2 Balkens beräkningar i Robot

Beräkningsrapporten från Robot presenteras i Bilaga 2. Rapporten kan till viss del vara otydlig att läsa. Avsnitt 2.4.1 i beräkningsrapporten ovan visar dimensionerande moment i brottgränstillstånd. De relevanta punkterna för detta fall är under avsnitt 2.6 som visar den mängd armering som räknades fram. Avsnitt 2.4.4 visar nedböjning och sprickvidd.

3.2 Armering av pelare i Robot

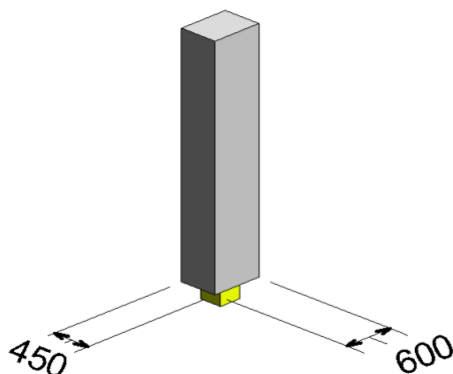
Undersökningen mellan Revit och Robot fortsätter med analys av en betongpelare. På samma sätt som tidigare med balkstrimlan ritas den först upp i Revit för att sedan överföras till Robot där den analyseras med en punktlast på ovankanten. Därefter ska Robot generera armeringen som behövs och sedan föras tillbaka till Revit. Då granskas den nya Revit-modellen för att kunna verifiera att armeringen har överförts på korrekt sätt från Robot.

Pelarens uppbyggnad inklusive dess materialegenskaper för undersökningen presenteras i Tabell 3 nedan. Övriga ingångsvärden har ej modifierats.

Tabell 3. Pelarens struktur och egenskaper.

Indata	
Revit-element	Concrete-Rectangular-Column 450 x 600 mm
Variabel last	1 kN
Exponeringsklass	XC2
Betongklass	C25/35

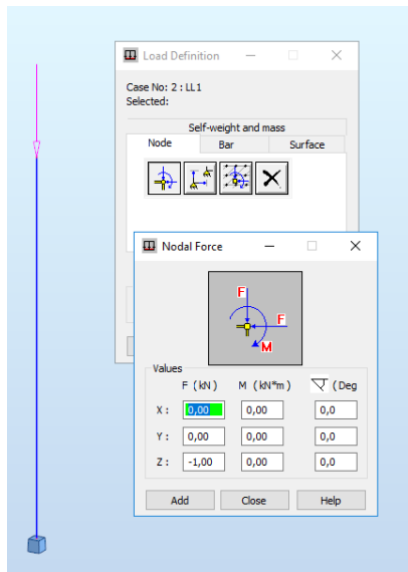
Pelaren ritas upp i Revit med ett upplagsförhållande som är fast inspänd på undersidan enligt Figur 19.



Figur 19: Pelare i Revit.

Pelaren överförs därefter till Robot Structural Analysis genom den inbyggda integrationslänken men denna gången tas egenvikten av pelaren med. Pelaren öppnas då som en analytisk linje i Robot. Materialegenskaper som betongklass och exponeringsklass kan justeras efter önskade behov i fliken "Analysis" som i avsnitt 3.1. I det här fallet används ingångsvärden från Tabell 3.

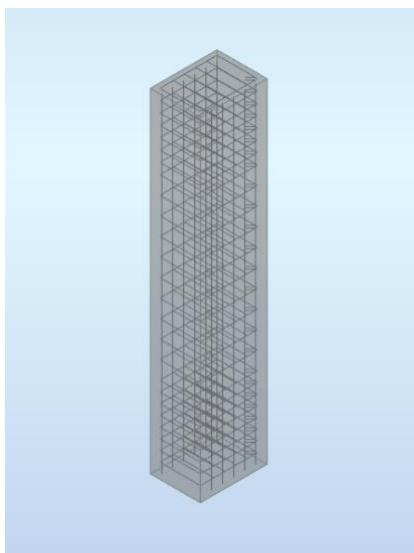
I verktyget "load definitions", väljs en punktlast med en storlek av -1 kN i z-led (Figur 20). Anledningen till att den är negativ är på grund av att z-axeln är definierad som positiv uppåt.



Figur 20: Applicering av punktlast motsvarande 1 kN på pelaren.

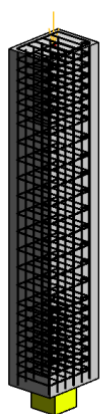
När pelaren ska dimensioneras och armeringen ska genereras är det samma process som i fall 3.1 med balkstrimlan. Robot vill veta vilka laster den ska ta hänsyn till och för det här fallet tas det också bara hänsyn den variabla lasten och egenvikten.

När alla inställningar är klara beräknas och genereras armering via "Start Calculations" som i tidigare fall och därefter visas en 3D-modell av pelaren med den genererade armeringen under fliken "Column - reinforcement", se Figur 21. I fliken "Column note" genereras en automatisk beräkningsrapport där indata och resultat presenteras, precis som det gjorde för balkstrimlan tidigare.



Figur 21: Den genererade armeringen i Robot.

Därefter uppdateras den befintliga Revit-modellen med den inbyggda länken som tidigare i fall 3.1. Inget felmeddelande kommer upp från och hela modellen är nu uppdaterad med resultatet, och armeringen har flyttats över till Revit-modellen, se Figur 22.



Figur 22: Betongpelaren i Revit efter uppdateringen från Robot.

3.3 Armering av platta i Robot

En annan del av undersökningen handlar om armering för betongplattor. På samma sätt som tidigare med balkstrimlan och pelaren, ritas plattan först upp i Revit för att sedan överföras till Robot där plattan analyseras med en jämnt utbredd last. Sedan skall nödvändig armering för plattan genereras i Robot och därefter överföras tillbaka till Revit. Den nya Revit-modellen granskas sedan för att kunna verifiera att armeringen i betongplattan har förts över och återges korrekt i Revit.

Plattans uppbyggnad inklusive dess materialegenskaper för undersökningen presenteras i Tabell 4 nedan. Övriga ingångsvärden har ej modifierats.

Tabell 4. Plattans struktur och egenskaper.

Indata	
Revit-Element	Floor Structural: Generic 300 mm
Material	Concrete - Cast-in-Place Concrete - C25/30
Ytlast	1 kN/m ²
Exponeringsklass	XC2
Täckskikt	20 mm
Betongklass	C25/35
Dimensioner	10 x 15 m
Avstånd mellan stänger	10 cm

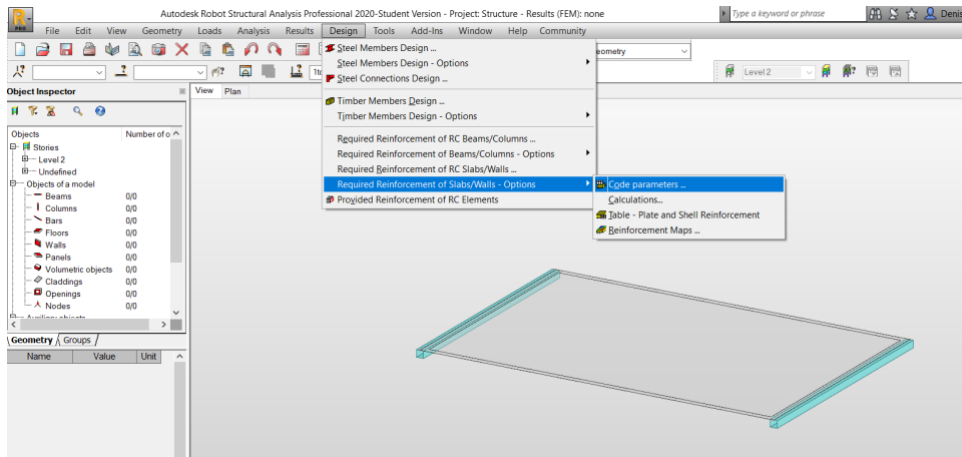
Betongplattan ritas i Revit enligt Figur 23, därefter ansätts angivet material, täckskikt och dimensioner från Tabell 4 och överförs därefter till Robot genom den inbyggda integrationslänken som i tidigare fall.



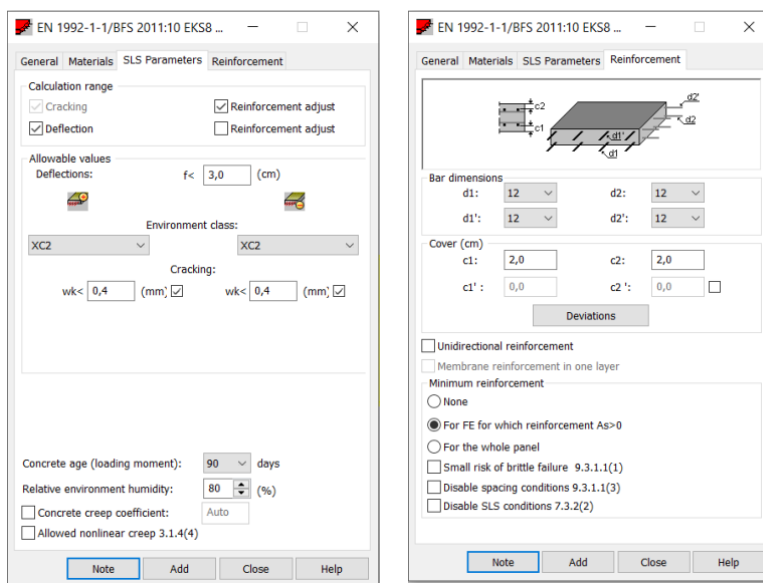
Figur 23: Betongplattan i uppritad Revit.

När betongplattan öppnas som en analytisk modell i Robot används högerspalten med olika verktyg för att applicera linjeupplag tillsammans med en ytlast på 1 kN/m². Vid dimensionering av armering behöver materialegenskaper som exponeringsklass och täckskikt ställas in i Robot efter önskade behov via fliken "Design", se Figur 24 och 25.

I det här fallet modifieras enbart exponeringsklasserna till XC2 och täckskiktet till 2,0 cm som angivet i Tabell 4 med anledningen av att efterlikna Revit-modellen för att minimera eventuella fel.



Figur 24: Åtkomst till betonggolvs materialegenskaper.



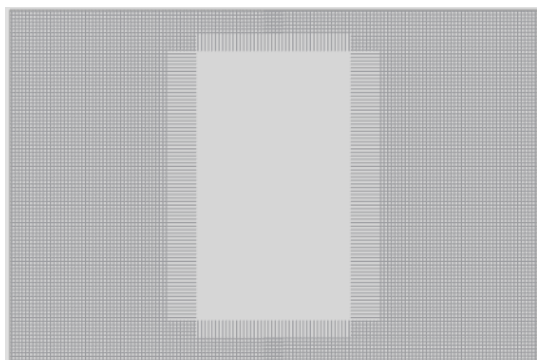
Figur 25: Ändring av plattans exponeringsklass och täcksskikt i Robot.

Därefter körs funktionen "Calculations" för att sedan klicka sig vidare till "Provided reinforcement of RC elements". I det här steget vill Robot veta vilka laster programmet ska ta hänsyn till och för det här fallet tas det också bara hänsyn den variabla lasten och egenvikten.

Innan erforderlig armering kan räknas fram behöver vissa inställningar i programmet att modifieras efter önskade behov, bland annat att armeringstypen skall bestå av stänger istället för nät. Det här kan ändras i inställningarna genom att klicka på "Reinforcement Pattern" och endast bocka in "bars". Därefter behöver avståndet mellan stängerna anpassas efter önskade värden. I det här fallet sätts avståndet mellan stängerna till 10 cm utifrån ingångsvärdet i tabell 4.

När inställningarna är klara beräknas och genereras armering via "Start Calculations". När beräkningarna är färdiga visas en 3D-modell av plattan med den genererade armeringen under fliken "Slab - reinforcement", se Figur 26. I

"Calculation note" i högerspalten, genereras en automatisk beräkningsrapport där indata och resultat presenteras.



Figur 26: Den genererade betongplattan i Robot från ovansidan med armering i ovankant.

Revit modellen uppdateras därefter med resultatet från Robot, detta med den inbyggda länken som tidigare med balkstrimlan och pelaren i avsnitt 3.1 respektive 3.2. I det här fallet väljs "Update model and results".

När betongplattan uppdateras med resultaten från Robot uppdateras inte Revit-modellen med den genererade armeringen. Inga felmeddelanden eller varningar kommer upp och överföringen ser lyckad ut enligt dialogrutan.

3.3.1 Generering av armering med SoFiStiK

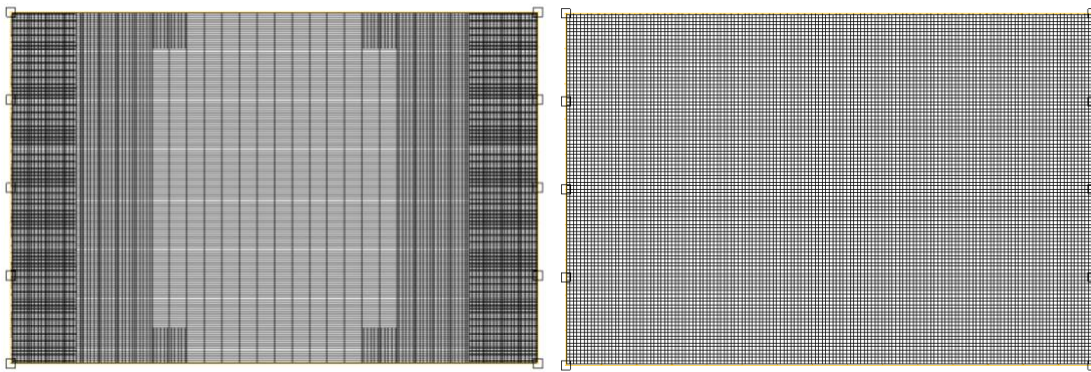
I Revit finns det ett tredjepartsplugin som heter SOFiSTiK Reinforcement Generation 2020 som automatiskt genererar 3D-armering i Revit-modellen baserat på beräknade analys- och designresultat importerade från Robot, eller i utvecklarens egna FEM-program "FEA-Analysis". Insticksprogrammet ger ett genererat förslag på hur plattan skulle kunna armeras och samtidigt uppfylla kraven på nödvändig armeringsmängd, det här kan sedan modifieras helt fritt. I det här fallet används analysresultaten från Robot som "Revit results package" i Sofistik.

Genereringen i Sofistik sker med hänsyn till att uppfylla kraven för nödvändig armering och att efterlikna resultaten i Robot genom att modifiera inställningarna enligt Tabell 5.

Tabell 5: Inställningarna i Sofistik för generering av armering i betongplatta.

Placering	Diameter [mm]	Avstånd mellan stängerna [mm]
Ovankant - Längsgående	14	100
Ovankant - Tvärgående	8	100
Underkant - Längsgående	10	100
Underkant - Tvärgående	8	100

Väljs det däremot att inte ta med huvudarmering (Base Reinforcement) i Sofistik, som placerar armeringsmängden jämnt överallt kommer Sofistik bara att generera armering där det är nödvändigt, se Figur 27 för jämförelse.



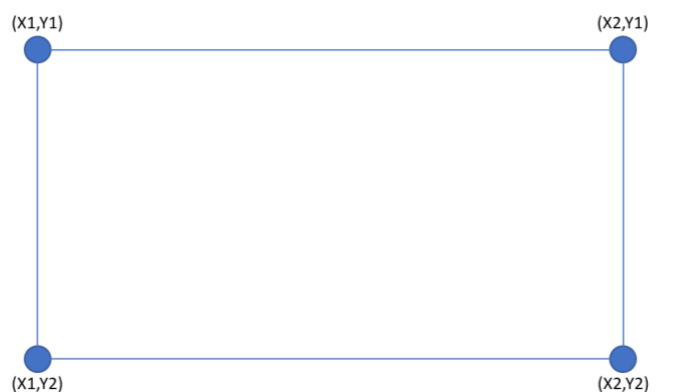
Figur 27: En jämförelse mellan plattorna i Revit utan huvudarmering (vänster) respektive med huvudarmering (höger) i ovankant.

Efter att önskade inställningar är genomförda såsom valet av att ha med huvudarmering används knappen "OK" för att plattan skall armeras. Inga felmeddelanden observeras och framtagningen av 3D-armering är genomförd. Om det önskas att kontrollera ifall betongplattan uppfyller kraven för nödvändig armering har Sofistik en ytterligare funktion som heter "Check". Under genomförandet av kontrollen markeras modellen som ska kontrolleras samt vilket analysresultat Sofistik ska ta hänsyn till när kontrollen genomförs.

3.3.2 Överföring av Robot resultat med Dynamo

Då överföringen inte fungerar direkt med den inbyggda länken för armering av plattor används Dynamo för att kringgå problemet. Från beräkningsrapporten i Robot framgår det koordinater, som i sin tur bildar areor där armering har placerats, med en riktning, en viss diameter och ett visst avstånd. Vart koordinatsystemet har sin nollpunkt beror på hur golvet är ritat och måste således kontrolleras i Robot. Oftast utgår Robot från att nollpunkten är det vänstra övre hörnet på golvet. Arbetsflödet med noderna i Dynamo presenteras i Bilaga 2.

Koordinaterna som framgår är av typ (x_1, y_1) och (x_2, y_2) , det är koordinaterna för hörnen på en rektangel. De andra två koordinaterna blir således (x_2, y_1) och (x_1, y_2) , vidare kallat (x_3, y_3) och (x_4, y_4) . Dessa bildar då tillsammans en sluten rektangel och kan således representera en area, se Figur 28 nedan.



Figur 28: Koordinatsystem som bildar en area.

Informationen från beräkningsrapporten överförs först till excel där ett antal olika blad förbereds med relevant information. Bladen delas upp i "Main", "Perpendicular", "Bottom" samt "Spacing" för att enklare kunna hämta specifika data och sortera listor.

Koordinaterna som hämtas från beräkningsrapporten är angivna i meter, därmed behöver koordinaterna multipliceras med 1000 för att erhålla millimeter som är den inställda enheten i Revit. I det förinställda bladet kopieras (x1,y1,x2,y2) från beräkningsrapporten in under respektive koordinatkolumner i det valda bladet. I bladet sker sedan en automatisk omvandling till millimeter och de övriga 2 koordinaterna skapas automatiskt, se Figur 29.

Top reinforcement															
Name	coordinates				Provided rein s [mm] / (cm)	At (cm2/m)	Ar (cm2/m)								
	x1	y1	x2	y2				A	B	C	D	E	F	G	H
1/1+(1/10+) Ax Main	0	-5	6,5	-4,5	8,0 / 6,0	4,74 <	8,38	1	x1						
1/2+(1/10+) Ax Main	0	-0,5	6,5	0	8,0 / 6,0	5,23 <	8,38	2		0	-5000	6500	-4500	6500	-5000
1/3+(1/10+) Ax Main	3,5	-4,5	6,5	-0,5	8,0 / 6,0	7,36 <	8,38	3		0	-500	6500	0	6500	-500
1/4+(1/10+) Ax Main	9,5	-5	10	-4,5	8,0 / 6,0	4,52 <	8,38	4	3500	-4500	6500	-500	6500	-4500	3500
1/5+(1/10+) Ax Main	9,5	-0,5	10	0	8,0 / 6,0	4,52 <	8,38	5	9500	-5000	10000	-4500	10000	-5000	9500
1/6+(1/10+) Ax Main	0	-5	0,5	0	8,0 / 24,0	0,11 <	2,09	6							
1/7+(1/10+) Ax Main	0,5	-5	10	-4,5	8,0 / 24,0	0,00 <	2,09	7							
1/8+(1/10+) Ax Main	0,5	-0,5	10	0	8,0 / 24,0	0,00 <	2,09	8	500	-5000	10000	-4500	10000	-5000	500
1/9+(1/10+) Ax Main	3	-4,5	7	-0,5	8,0 / 24,0	0,00 <	2,09	9	500	-500	10000	0	10000	-500	500
1/10+ Ax Main	9,5	-4,5	10	-0,5	8,0 / 24,0	0,11 <	2,09	10	3500	-4500	6500	-500	6500	-4500	3500
	0	0	0	0				11	9500	-5000	10000	-4500	10000	-5000	9500
1/11+(1/10+) Ay Perpendicular	0	-5	0,5	-4,5	6,0 / 4,0	4,52 <	7,07								
1/12+(1/10+) Ay Perpendicular	0	-0,5	0,5	0	6,0 / 4,0	4,52 <	7,07								
1/13+(1/10+) Ay Perpendicular	3	-5	7	0	6,0 / 4,0	6,76 <	7,07								
1/14+(1/10+) Ay Perpendicular	9,5	-5	10	-4,5	6,0 / 4,0	4,52 <	7,07								
1/15+(1/10+) Ay Perpendicular	9,5	-0,5	10	0	6,0 / 4,0	4,52 <	7,07								
1/16+(1/10+) Ay Perpendicular	0	-5	0,5	0	6,0 / 24,0	0,14 <	1,18								
1/17+(1/10+) Ay Perpendicular	0,5	-5	10	-4,5	6,0 / 24,0	0,02 <	1,18								
1/18+(1/10+) Ay Perpendicular	0,5	-0,5	10	0	6,0 / 24,0	0,03 <	1,18								
1/19+ Ay Perpendicular	9,5	-4,5	10	-0,5	6,0 / 24,0	0,14 <	1,18								

Figur 29: Excelfil med koordinatinformation, till höger exempel på "Main".

Processen i Dynamo att hantera Exceldata är uppdelad i fem olika steg:

- Hämta data från Excelfil
- Skapa nytt lokalt koordinatsystem
- Reducera ner till listor med enbart siffror
- Skapa punkter och ansluta dem
- Skapa armering

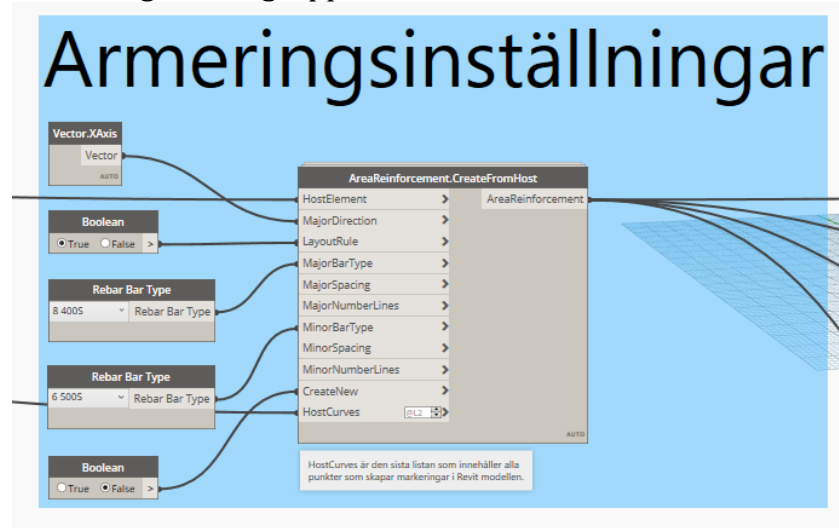
Koordinaterna som återges i Excelfilen är av lokal typ och därför måste ett nytt lokalt koordinatsystem skapas i Dynamo, från ett ursprungligt globalt koordinatsystem. Från Robot är det givet att nollpunkten är i det vänstra övre hörnet. I Dynamo används noden "Select Edge" och "Curve.StartPoint" för att kunna markera den punkt i det globala koordinatsystemet där det nya lokala koordinatsystemet skall utgå ifrån. Via "Point.ByCoordinates" och "CoordinateSystem.ByOrigin" kan ett nytt koordinatsystem skapas som utgår från det valda hörnet.

Datan hämtas via noden "Data.ImportExcel" som kräver två inputs i form av en filsökväg till en Excelfil samt namn på bladet som datan skall hämtas från. Listan reduceras ner till att enbart behålla alla siffervärden via noden "List.GetItemAtIndex". Listan plattas sedan ut vilket innebär att alla undernivåer försvinner och alla värden återfinns i en och samma lista utan undernivåer. För att göra det här används noden "List.Flatten" för att kunna användas igen med "List.GetItemAtIndex" där alla X1-X4 och Y1-Y4 koordinater plockas ur.

Punkterna i Revit filen skapas med *"Point.ByCartesianCoordinates"* som kräver tre inputs i form av x-värde, y-värde samt punkten varifrån det lokala koordinatsystemet har sin nollpunkt, skapat ovan.

Därefter paras koordinaterna ihop med varandra för att skapa listor som innehåller 4 punkter. Listan innehållande alla koordinatpar används sedan som input till *"PolyCurve.ByPoints"*. I den noden finns det möjlighet att ansluta den första punkten till den sista, vilket sätts till *"true"*. Alla punkter är slutna och representerar olika areor.

För att kunna skapa armeringen används noden *"AreaReinforcement.CreateFromHost"* som är utgiven från utvecklaren BIM4STRUC, Figur 30. Ursprungligen kan denna nod enbart skapa en homogen armering för hela plattan. Noden måste då anpassas med nya rader Python kod för att kunna bli mottaglig för listor med olika area-markeringar. Den koden som behövs läggs till finns tillgänglig som öppen källkod på Dynamo forumet och presenteras i Bilaga 3. Vidare så behöver *"HostCurves"* i noden ändras så att den läser av från den andra nivån från den inkommande listan för att area-markeringarna är grupperade i en undernivå.



Figur 30: Nod från BIM4Struc som skapar armering.

Med den här noden skapas armering i både huvudled och tvärled, i både ovan och underkant medan indata enbart gäller för ovankant i huvudriktning. För alla *"Structural Area Reinforcement"* som har skapats måste de oönskade areorna bockas ur.

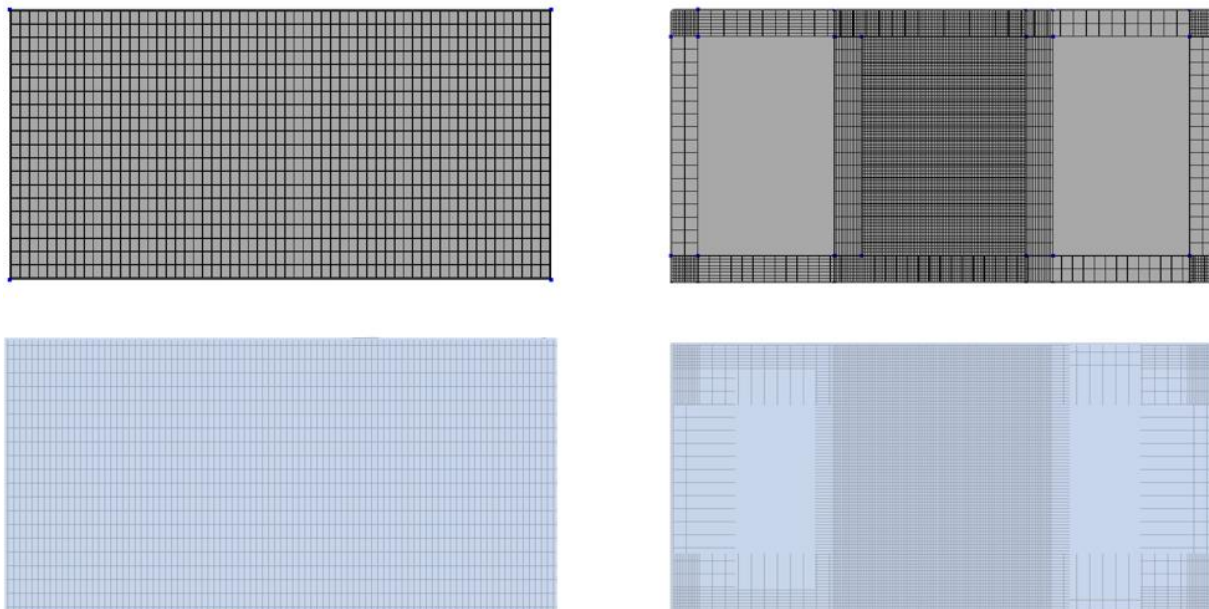
Med noden *"Element.SetParameterByName"* går det att namnge vilken parameter som skall sättas till vad, för alla element som skapats.

På samma sätt som ovan, hämtas data från Excel med information om avstånd mellan stänger. Här används återigen *"Element.SetParameterByName"* för att göra det möjligt att sätta korrekt avstånd i de respektive areorna.

För att generera armering i tvärled samt underkant repeteras stegen ovan med samma Dynamo kod som istället hämtar data från *"Perpendicular"* och *"Bottom"*. Det som behöver modifieras är hur koden sorterar listorna, beroende på hur

många rader som finns i Excel filen. Om ändringarna inte genomförs kommer koden antingen ta med för få värden, eller noll-värden. Det här kommer i sin tur ge felmeddelanden.

För armering i underkant blir det rätt jämfört med Robot men i ovkant saknas det armering på olika platser, se Figur 31.



Figur 31: Jämförelse mellan armering skapad via Dynamo (ovan) och armering i Robot (under). Armering i underkant till vänster och armering i överkant till höger.

3.4 Armering av pelare-balk i Robot

Då enskilda komponenter har analyserats och armerats är nästa steg att göra en beräkning av ett enkelt system bestående av balkar och pelare. Detta för att undersöka om det krävs en annan metod och vilka eventuella problem som kan dyka upp när ett system analyseras istället för enskilda komponenter. Samma balk som användes i 3.1 kommer att analyseras här också, för att upptäcka om det blir skillnader beroende på hur den är modellerad, med inritade pelare som upplag, eller fiktiva upplag.

Pelare-balkens uppbyggnad inklusive dess materialegenskaper för undersökningen presenteras i Tabell 6 nedan. Övriga ingångsvärden har ej modifierats.

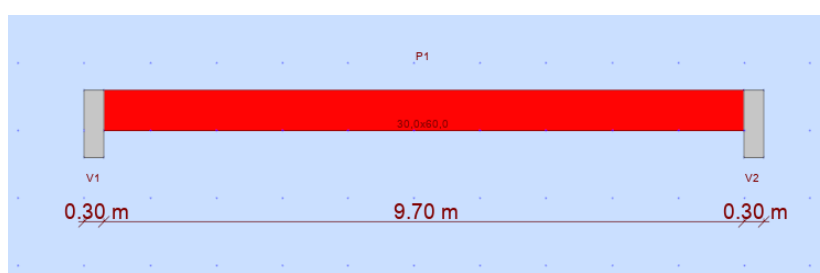
Tabell 6: Pelare-balkens struktur och egenskaper.

Indata	
Variabel last	6,9kN/m
Egentyngd	9 kN/m
Exponeringsklass	XS1
Betongklass	C35/45
Balk dimensioner	10 m (60x30)
Pelare dimensioner	3 m (30x30)

Som tidigare ritas balken och pelarna upp i Revit. Balken ritas med en längd på 10 meter precis som i avsnitt 3.1, varav "cut length" blir 9,7 meter. Då stöden är 300 millimeter breda ligger balken på halva stöden vilket innebär att dess effektiva längd blir 9,7 meter. Pelarna placeras ut i vardera hörn med en höjd på 3 meter.

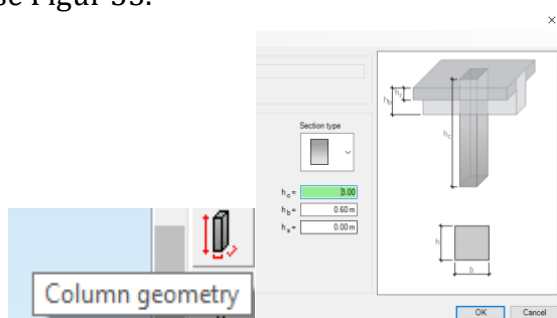
Modellen överförs därefter till Robot med den inbyggda länken som i tidigare fall där laster och randvillkor placeras ut. Lasterna är samma som i fall 3.1. Pelarna väljs till fast inspända i marken och balken ritas som fritt upplagd. Moment och tvärkraft beräknas innan konstruktionen tas vidare till armeringsverktyget. Även för det här fallet tas det bara hänsyn den variabla lasten och egenvikten.

I Robot får nu balken och systemet en total längd på 10,3 meter vilket stämmer överens med konstruktionen i Revit, se Figur 32.



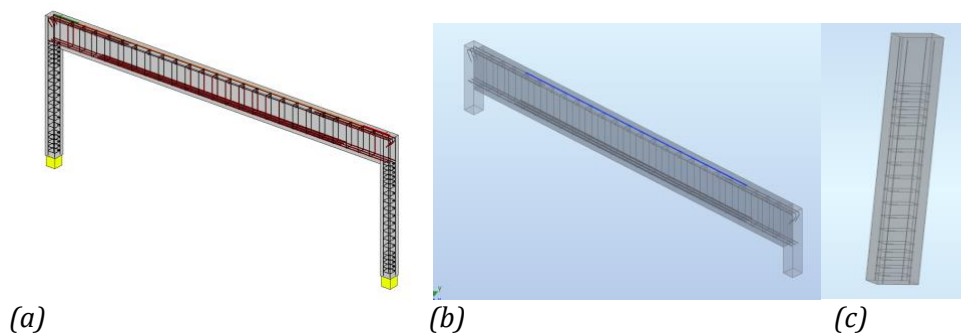
Figur 32: Balkens geometri för beräkning av armering

Förinställningar från analysen med balken laddas in vilket innebär att programmet räknar med samma parametrar som tidigare. För pelarna har Robot uppfattat höjden som 3,3 m istället för 3 m, det här ändras i "Column geometry", se Figur 33.



Figur 33: Ändring av pelarhöjd.

Revit-modellen uppdateras likt tidigare och den genererade armeringen har överförts helt korrekt, se Figur 34 nedan.



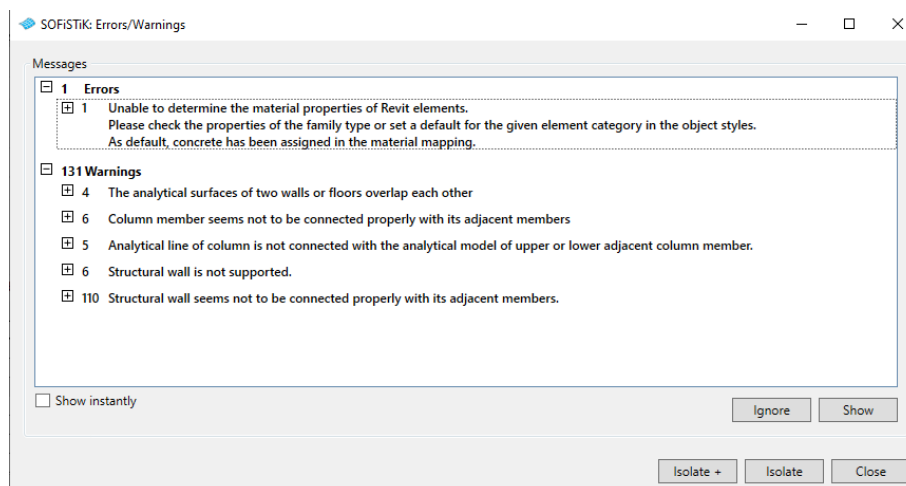
Figur 34: Fullständig konstruktion i Revit (a), armerad balk i Robot (b), armerad pelare i Robot (c)

Beräkningsresultatet från Robot och jämförelser med enbart balkstrimlan redovisas i avsnitt 4.1

3.5 Referensprojekt Kongahälla 5:2

Ett utav referensprojekten är Kongahälla som VBK har projekterat. Det är ett bostadshus som består av 8 våningar och 31 lägenheter. Det bärande systemet består av platsgjutna väggar av betong samt balkar och pelare av stål. Bjälklaget är uppbyggt med plattbärlag och samverkande betong. Betongbalkarna är således ingjutna i bjälklaget. Grundläggningen sker med hjälp av betongpålar. Innan modellen kan överföras till Robot måste den analytiska modellen först justeras och korrigeras för att allting ska hänga samman och bli kontinuerligt.

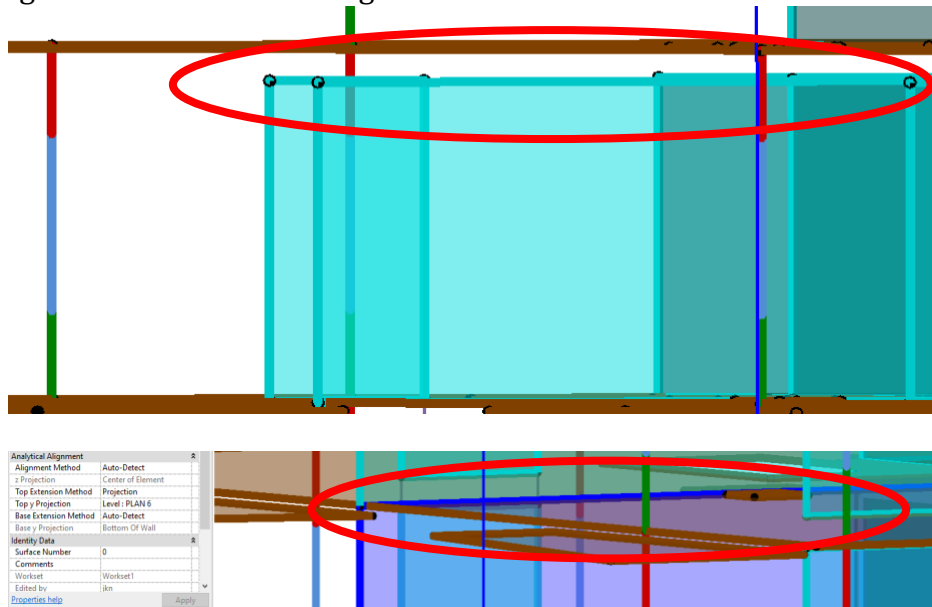
Figur 35 nedan visar resultatet av en kontroll av den analytiska modellen, innan modellen går att räkna med måste dessa fel korrigeras.



Figur 35: Varningar för fel i den analytiska modellen.

Beslut om vilka element som är nödvändiga för analys måste bestämmas, samt hur stöd och randvillkor skall definieras. Den tillgängliga Revit-modellen är egentligen en komplett strukturmodell men med vissa delar som möjligtvis inte har någon inverkan på konstruktionens hållfasthet. Dessa delar exkluderas därför i projektet.

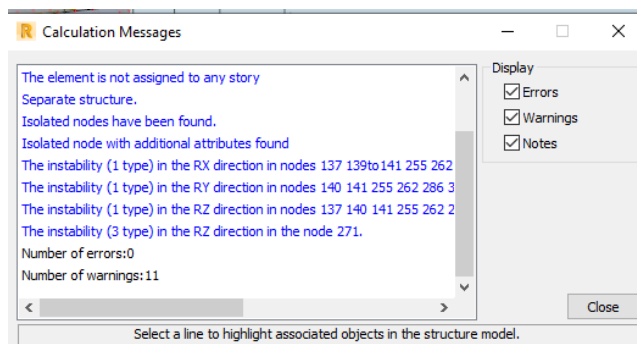
Då majoriteten utav felen beror på att väggarna i modellen inte är sammanhängande, väggarna har ingen anslutning på ovansidan. Standardinställningar är "Auto detect" som i detta fall inte gav ett tillförlitligt resultat. Det här problemet löses genom att ändra "Top extension method" från auto-detect till "projection" och välja vilket plan (nivå) den skall nå upp till, se Figur 36 med rödmarkering.



Figur 36: Före och efter bild på vägg efter "extension method". Högst upp visas vägg som inte går ända upp till nästa plan, bilden under visar efter vald extension method att väggen nu går ända upp

Modellen justerades tills dess att inga varningar kvarstod. Därefter skickades modellen över till Robot för att applicera laster och lastkombinationer. För att kunna framställa ett så bra resultat som möjligt justerades modellen ytterligare för att kunna återspegla den FEM-Design-modellen som fanns som referens.

En analys utan laster genomfördes för att upptäcka fel som inte upptäckts i Revit. Här ger Robot varningar om instabilitetsproblem som presenteras i Figur 37 nedan.



Figur 37: Instabilitetsvarningar i Robot.

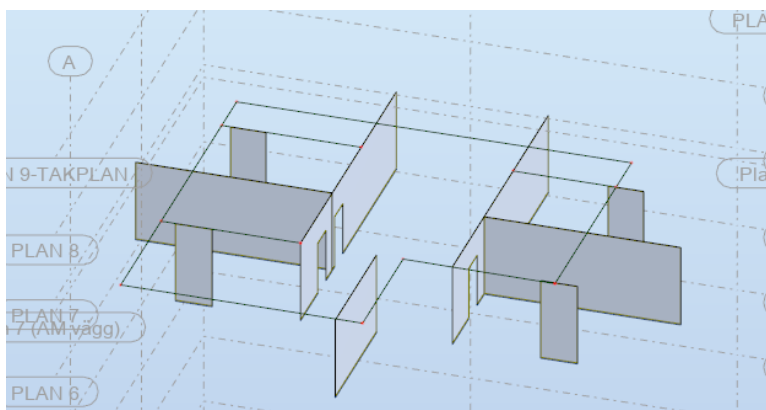
I modellen visar det sig att vissa noder inte är anslutna till varandra. Vid en översiktlig koll ser allting ut att vara sammankopplat men vid förstoring är

noderna inte sammanhängande, se Figur 38 nedan. Noderna kopplades tillsammans och varningarna försvann.



Figur 38: Noder som inte är sammankopplade

Då huvudsyftet är att räkna fram lasteffekterna på betongbalkarna bestämdes det att lyfta ut våningen där betongbalkarna var placerade för en mindre analys, se Figur 39. Detta var också någonting som hade blivit gjort i FEM-Design modellen, vilket lade grunden till beslutet. Golvet i Robot raderades och ersattes av "claddings" vilket är en yta som bara överför laster till andra konstruktionsdelar. Det här gjordes då ett golv/platta i Robot har avstyvande effekter och kommer att bära upp ytlasterna och inte föra dem vidare till balkarna, det här skulle i så fall underskattat lasterna som balkarna måste bära upp.

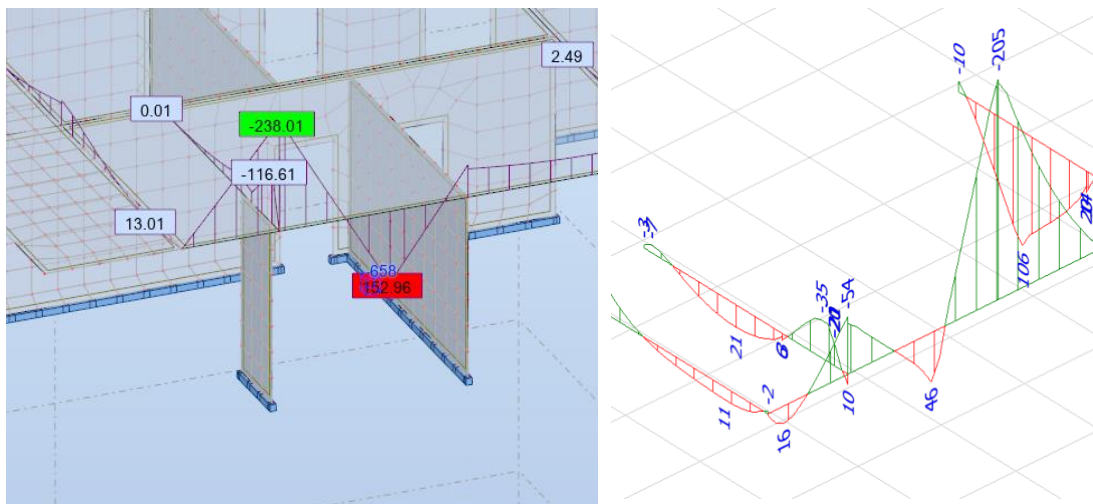


Figur 39: Våning 7 utlyft som separat modell i Robot.

Därefter applicerades lasterna som hämtades direkt ur beräkningsingenjörens FEM-Design-modell. Det fanns tre olika typer av laster.

1. Permanenta laster
2. Variabla laster
3. Brottgränslaster från ovanstående våningar i form av punktlaster

Eftersom de två våningarna ovan är ansluta till betongbalkarna via stålpelare, applicerades dessa som punktlaster där pelarna är anslutna. Lastvärdena som applicerades är karakteristiska laster. När alla laster och stöd var utplacerade analyserades modellen och lasteffekterna som räknades fram skiljde sig från FEM-Design-modellen avsevärt.



Figur 40: Momentfördelningen längs en kontinuerlig balk. t.v. i Robot och t.h. i FEM-Design.

I Figur 40 ovan visas momentkurvan för en kontinuerlig balk. Den stora skillnaden mellan modellerna är hur punktlasten från ovanstående våningar hanteras. I Robot blir undersidan dragen med ett ca 3,5 gånger högre moment än i FEM-Design. Den andra stora skillnaden är att det negativa momentet över stöden hamnar på det vänstra stödet i Robot, medan det i FEM-Design hamnar över det högra. Magnituden på det negativa momentet skiljer sig ca tio procent. Lasteffekterna fick tillslut anses som godtagbara och balkarna kunde då armeras.

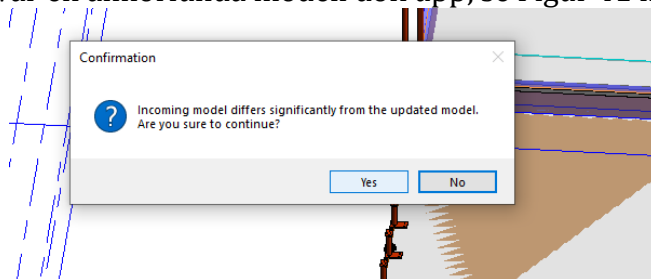
För att få efterlikna ett likt resultat som den riktiga produktionsmodellen gjordes vissa val i Robot.

1. Tvärkraftsarmeringens diameter kan vara 6-12mm
2. Böj-armeringens diameter kan vara 10-20mm
3. Betongens hållfasthetsklass valdes till C35/45

Med dessa inställningar får Robot automatiskt välja antal stänger och diameter på armeringen.

Armering räknades fram utan varningar. Dock vid första syn skiljde sig armeringen från den som fanns i produktionsmodellen, och det beror troligtvis på att lasteffekterna inte är helt identiska.

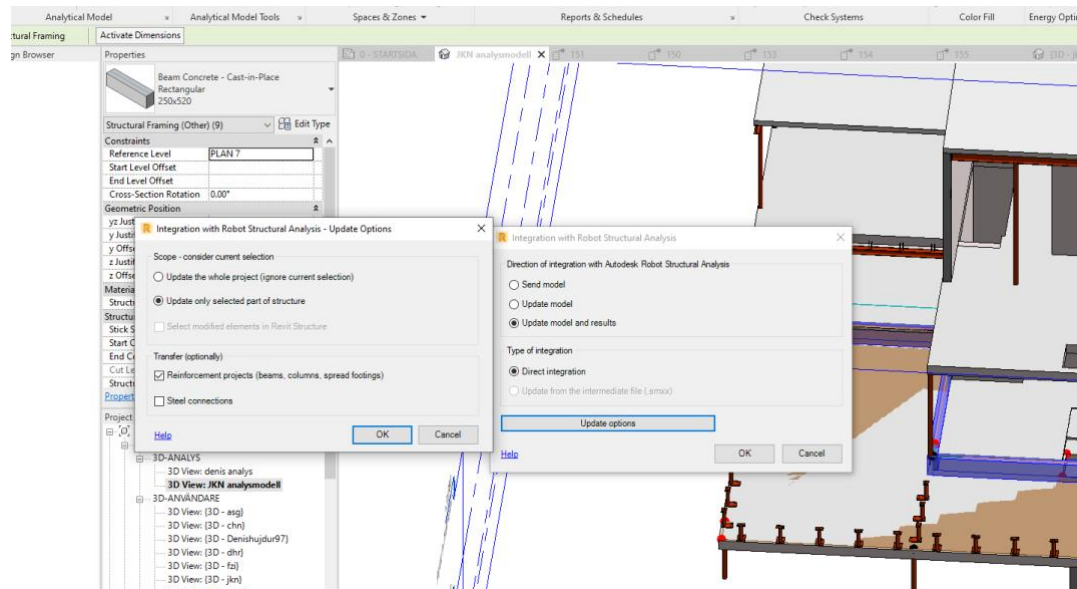
När modellen därefter skulle skickas tillbaka till Revit valdes "update model" från fliken i Revit, samt att rutan för armering bockades i. En varning för att det var en annorlunda modell dök upp, se Figur 41 nedan.



Figur 41: Varningsmeddelande om att balken skiljer sig avsevärt.

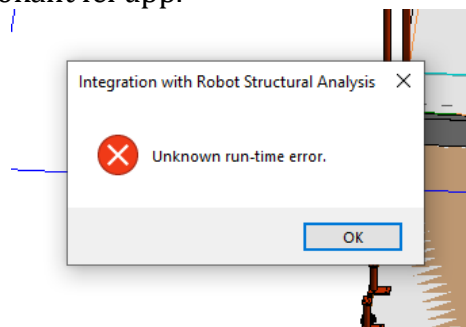
Det här medförde att hela Revit-modellen blev uppdaterad med Robot-modellen vilket innebar att det som inte fanns i Robot-filen blev raderat. Filen kunde ändå räddas genom att ångra senaste ändringar.

I Revit finns alternativet att välja vilka element som skall uppdateras, varpå enbart balkarna valdes för att bli uppdaterade se Figur 42 nedan.



Figur 42: Alternativ att kunna välja element vid uppdatering av Revit-modell.

Det här sättet att uppdatera modellen fungerar inte. Istället kom en varning om okänt fel upp.



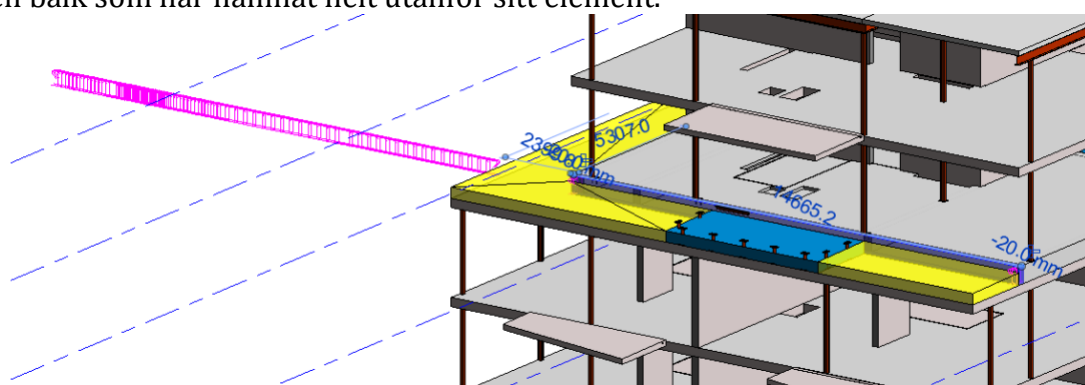
Figur 43: Varning om okänt fel.

Problemet verkar grunda sig i att Windows inte kan identifiera en .dll fil som krävs för att programmet skall fungera. Den angivna lösningen som fanns att tillgå på Autodesk hemsida testades men fungerade inte.

För att komma runt problemet användes den inbyggda länken mellan Revit och Robot istället i Robot via "Send model" från Robot, istället för att välja att uppdatera den befintliga Revit-modellen. Enbart balkarna markeras och väljs för att skickas över, samt att rutan för armering bockas i. Det här sättet fungerade utan varningar.

I Revit dyker en varning upp angående att armeringen är placerad utanför sitt "värdelement". Alltså att armeringen har blivit helt felplacerad. Varningen

accepterades för att kunna se resultatet. Figur 43 nedan visar på armeringen för en balk som har hamnat helt utanför sitt element.



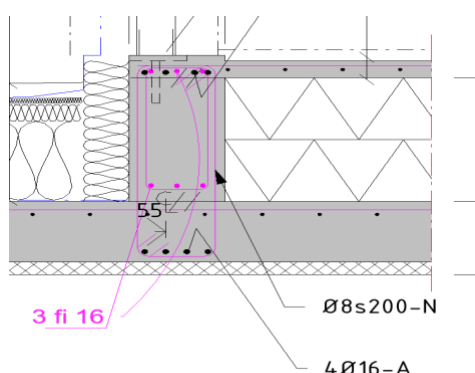
Figur 43: Förskjuten armering utanför balk.

Som i avsnitt 3.1 hamnar armeringen utanför om modellerna inte stämmer geometriskt i Revit och Robot.

För vissa balkar har armeringen hamnat på rätt ställe, men att förankringen har stuckit utanför balken. I övrigt återfanns armering helt svävandes i mitten av byggnaden, oklart vart den kom ifrån.

Problemet med förankringen återfinns i att balken i produktionsmodellen är ingjutet i ett bjälklag och inte har ett distinkt "stöd" med ett visst mått på ytterkanterna. Detta gör att den geometriska modellen blir inkorrekt i Robot jämfört med Revit, då stödbredd måste definieras för att armering skall kunna räknas fram.

I en balk på andra sidan byggnaden hamnar armeringen ungefär på samma plats som den faktiska armeringen. Här återges återigen problemet med ingjutna balkar i bjälklag, där programmet inte tar hänsyn till att balken har en större höjd än vad som just är inställt i programmet. Det här leder till dragarmeringen hamnar på balkens botten-nivå dvs ca 0,25m från toppen, men där balkens botten i själva verket är botten på bjälklaget. Det här åskådliggörs i Figur 44 nedan. Då antalet stänger också skiljer sig åt blir placeringen i breddled inte densamma.



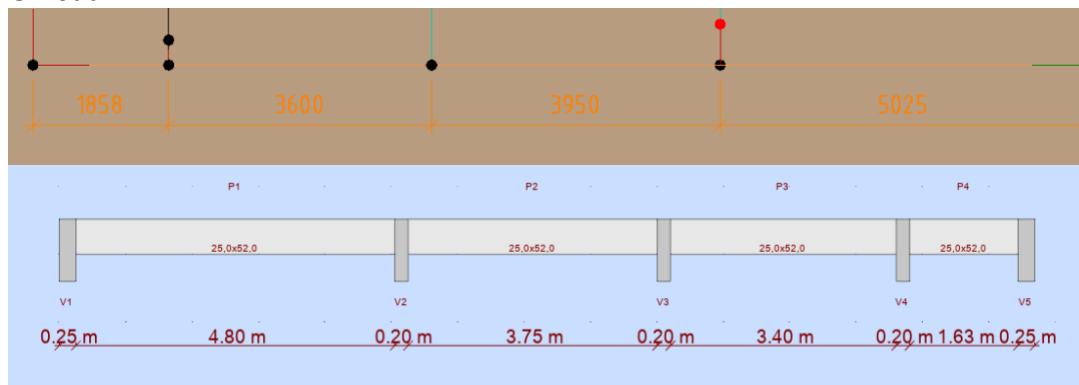
Figur 44: Rosa armering är den genererade, den svarta är den manuellt inritade.

Robot räknade fram att ha 3st fi 16 i över och underkant, samt fi 8 byglar med ett s-avstånd på 120mm. På andra sidan balken där snittkrafterna inte var lika stora

var armeringsdiametern istället 10 millimeter. Detta då Robot troligtvis optimerar armeringsinläggningen längs hela balken.

Det här skiljer sig från vad som användes i produktionsmodellen, där dragarmeringen utgjorde 4st fi 16 och tvärkraftsarmeringen fi 8 byglar med s-avstånd på 200mm.

För balken där armeringen placerades helt utanför balken justerades måtten i Robot för att efterlikna hur den är modellerad i Revit. Det visar sig att Robot har identifierat väggarna som 250mm breda medan den faktiska bredden är 200mm. Dessa ändras och balken har nu samma längd i Revit såväl som Robot, se Figur 45 nedan.



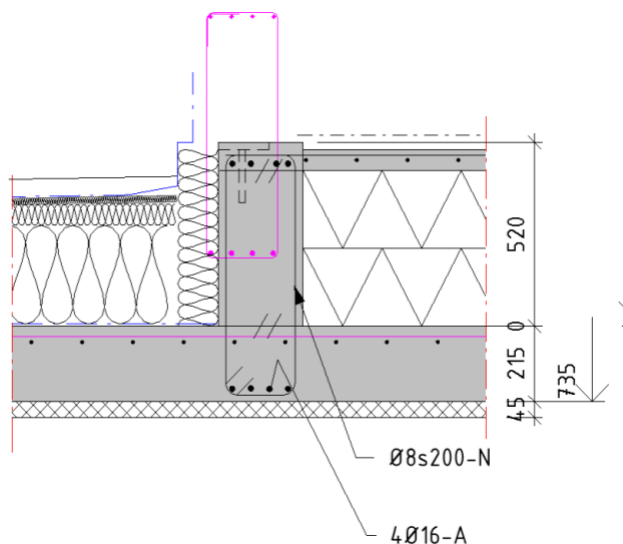
Figur 45: Balkens geometri i Revit respektive Robot, notera att balken är spegelvänd i Robot.

Samma beräkningsmetod och sätt att föra över armeringen används som tidigare. Även efter att mått har blivit korrigerade kvarstår samma fel med att armeringen hamnar utanför balken i longitudinell riktning.

Då informationen om rekommenderad armeringsmängd följer med de överförda resultaten implementeras därför SoFiStiK för att undersöka om armeringen blir placerad rätt med den programvaran, då för att se om fel föreligger i kopplingen mellan Revit och Robot.

I SofiStik måste användaren själv styra parametrarna huruvida den vill att armeringsinläggningen skall se ut. Då det också är styrt av databasfilen som är programmeringsbar gällande huruvida programmet skall tänka vid vissa scenarion. Till exempel är det möjligt att ställa in om höjden är inom ett visst intervall skall en specifik diameter användas. Det här gäller de flesta styrande parametrarna, därför är det viktigt att ändra dessa till aktuella normer eller arbetsnorm som gäller på arbetsplatsen.

Inställningarna i SoFiStiK ställs in för att efterlikna det framräknade resultatet i Robot, det vill säga att armeringens diameter ställs in till 16 mm och byglarna ställs in till 8 mm. I dialogrutan för inställningarna är det möjligt att kontrollera den faktiska mängden mot den teoretiskt nödvändiga. Detta för att säkerställa så att krav på minsta mängd armering uppfylls. När alla inställningar är valda körs programmet och armeringens placering presenteras i Figur 46 nedan.



Figur 46: Armeringens placering med Sofistik verktyg "Reinforcement generation".

Till synes blir armering felplacerad i höjd och breddled vilket gör att placeringen måste justeras manuellt. I longitudinell riktning blir armeringen placerad inom balkens längd. Om balkens höjd ökas med 250 mm så att balken skär bjälklaget kommer armeringen att följa med och förlängas vilket är åskådliggjort i figuren ovan.

4 Resultat

I det här kapitlet presenteras resultaten för de olika fallstudierna samt referensprojektet. Skillnader mellan Robot och Sofistik presenteras också.

4.1 Likheter och skillnader mellan Robot och handberäkning

I Tabell 7 nedan presenteras jämförelsen mellan den datorberäknade och handberäknade balkstrimlan. Resultaten mellan Robot och handberäkningen skiljer sig ungefär sju procent. Skillnaden beror på olika tolkningar utav balkens längd. Detta medför att den dimensionerande lasteffekten blir mindre i Robot. Det här medför i sin tur att mindre mängd armering krävs, och att nedböjningen därmed blir större. Att nedböjningen blir större beror också på att armeringen är avkortad i den datorberäknade balken. Praktiskt sett ger det en konstant krökningskurva i området där armeringen är avkortad, än att den följer momentkurvan som den gör i det handberäknade fallet.

Tabell 7: Jämförelse mellan handberäkning och Robot för en balk

	Robot	Mathcad	Skillnad [%]
Dimensionerande moment	240,73 kNm	259,2 kNm	7,1%
Momentkapacitet	260,09 kNm	277,73 kNm	6,35%
Mängd dragarmering	1206mm ² 6φ16	1407mm ² 7φ16	14%
Nedböjning	37mm	34,27mm	-7%

I Tabell 8 nedan presenteras resultaten för den enskilda balkstrimlan och balken som är upplagd på två pelare. Trots olika effektiva längder i Robot och Revit har resultaten ändå blivit densamma. Då stöden endast har med förankringen att göra så blir till synes dragarmeringen oförändrad oavsett upplagsbredd (för den enskilda balkstrimlan ansattes upplagsbredden till en meter).

Tabell 8: Jämförelse mellan en balk och balk-pelare system

	Balk	Balk-pelare	Skillnad [%]
Dimensionerande moment	240,73 kNm	240,73 kNm	0%
Momentkapacitet	260,09 kNm	260,09 kNm	0%
Mängd dragarmering	1206 mm ² 6φ16	1206 mm ² 6φ16	0%
Nedböjning	37mm	37mm	0%

Varför det blir skillnad mellan programmets beräkning och handberäkningen är svårt att förklara då Robot inte redovisar beräkningar och hur indata har använts i ekvationerna. Enligt beräkningsrapporten som framgår i Bilaga 2 så framgår det att ekvationerna beräknas med hänsyn till EKS 8 som är en gammal version av den svenska bilagan till Eurokoderna.

4.2 Överföring av 3D-armering från Robot till Revit

Syftet med examensarbetet var att undersöka och utveckla arbetsflödet av armering mellan Revit och Robot Structural Analysis med hjälp av externa verktyg som Dynamo och Sofistik som är två insticksprogram i Revit. I stora drag har undersökningen gett positiva svar men med vissa undantag då programmen brister inom vissa delar. Se Tabell 9 för en överblick av vad som var möjligt att överföra från Robot till Revit med respektive utan hjälp från insticksprogrammen.

Tabell 9: Summering av arbetsflödet av armering mellan Revit och Robot.

Robot Structural Analysis Professional	Autodesk Revit	Sofistik	Dynamo
Armering i pelare	✓		
Armering i balk	✓		
Armering i platta	✗	✓	✓
Armering i vägg	✗	✓	✓
Armering i pelare-balk	✓		

✓ : Fungerar korrekt

✓ : Överföring fungerar men brister uppkommer

✗ : Fungerar inte alls

För de olika konstruktionsdelarna blir resultatet olika. Det beror på hur det är modellerat och vilken del det gäller. Att enbart generera armering för enskilda element skapade problem i överföringen genom att armeringen antingen blev förskjuten i longitudinell led för balkar, eller att en extra bygel placerades precis i livet på pelaren. För plattor fungerar det inte att överföra framräknad armering, det går enbart att överföra analysresultaten om den teoretiska mängden som krävs. Det visar sig att med kontakt med Autodesk Support att Robot inte har möjligheten att överföra armeringen för betongplattor till Revit. Kopplingen tillbaka till Robot är inte fungerande vilket innebär att om armeringen modifieras i Revit följer den ändringen inte tillbaka med till Robot.

När den isolerade betongpelaren analyserades och dimensionerades för generering av armering placerades en bygel i ovankanten på ett felaktigt sätt. När samma generering utfördes med en ovanpåliggande betongplatta upphörde problemet. Det visar sig att Robot har felaktigheter när det kommer till att generera armering för enskilda element såsom en betongpelare utan anslutningar.

Materialegenskaper och materialparameterar som ställs in i Revit överförs tillsammans med modellen till Robot. Däremot så följer inte all information med med i beräkningsmodulerna i Robot vilket gör att användaren på nytt måste göra om samma val igen i Robot.

Med hjälp av SOFiSTiK Reinforcement Generation 2020 har det blivit möjligt att dimensionera och generera 3D-armering i Revit med hjälp av analysresultaten från Robot. För enskilda delar såsom balkar och pelare hamnar armeringen på rätt plats. När det kommer till betongplattor finns det olika valmöjligheter som påverkar slutresultatet såsom valet av diametern och avståndet mellan stängerna för huvudarmeringen, om det väljs att ha med. Sofistik ser till att generera extra armering om huvudarmeringen eventuellt inte skulle räcka till. När en kontroll av armeringen utförs med Sofistik har det visat sig att det saknas armering i kanterna. Med hjälp från Sofistik Support för att säkerställa vad som orsakar felet har det visat sig att det beror på täckskiktet som är oarmerat. Beräkningarna i Sofistik utförs med den tyska bilagan till Eurokoderna vilket innebär att en egenkontroll behöver genomföras.

För referensprojektet blev det för komplexa anslutningar då alla element inte hade helt definierade stödbredder i den ursprungliga produktionsmodellen på grund utav att balkarna var modellerade som ingjutna i bjälklaget. Det här medför att den överförda armeringen placerades utanför elementet i longitudinell riktning. Med hjälp av Sofistik användes istället analysresultaten för att generera armering, denna placerades korrekt i longitudinell riktning men blev placerades fel i höjd- och breddled. Då analysresultaten visar på andra lasteffekter än vad konstruktören hade räknat fram är mängden armering som genererades inte helt överensstämmande med det verkliga resultatet.

4.3 Förenkling med hjälp av Dynamo

Med hjälp av Dynamo är det möjligt att förenkla och effektivisera arbetsflödet. Med modifierade noder från paket utgivna av privatpersoner och företag är det möjligt att läsa av koordinater från Robot för att sedan skapa areor där armering genereras helt utifrån informationen som finns i Robot. För att kunna överföra armering från Robot till Revit användes Dynamo för att översätta koordinaterna för den beräknade armeringen för att sedan skapa zoner i Revit där area-armering skulle genereras. Den genererade armeringen i ovankant blir inte helt likadan vilket beror på att area-zonerna inte har medräknat förankringslängd av stängerna⁴. Det här medför i sin tur att information fortfarande saknas innan Dynamo tillsammans med Robot och Revit kan användas fullt ut.

4.3.1 Begränsningar

Begränsningen mellan Dynamo och Revit/Robot beror i huvudsak på att det inte finns noder skapade för just det specifika syfte rapporten undersöker. I sin tur beror det sedan på användarens programmeringskunskaper att kunna skapa egna noder för ett specifikt syfte. Till sist beror det på att det inte är programutvecklaren (Autodesk) själv som skapar paket som innehåller noder som är programmerade för specifika ändamål. Det här leder i sin tur att paketen inte blir uppdaterade och servade för nya versioner av Revit. En annan begränsning som uppstår är när inga felmeddelanden dyker upp vilket gör felsökningen svår när noderna inte fungerar som dem ska.

⁴ Kontakt med Autodesk support via mail den 1 April 2020

5 Diskussion

Ett utav det största hindret i Robot är att beräkningarna för betong fortfarande sker enligt EKS 8, denna nationella bilaga är över 6 år gammal vilket gör att resultaten blir otillförlitliga. Som tidigare nämnt har Autodesk planer på att uppdatera koderna men kunde inte ge en tidsram när det kommer att ske, vilket då snarare framstår som ett svar om vad de önskar än vad som faktiskt är planerat.

Handberäkningarna skiljde sig mot vad programmet räknade fram, det beror på att programmet använder andra partialkoefficienter för lasterna. Varför andra partialkoefficienter är inställda i programmet än vad som anges i Eurokoden är oklart. Skillnaderna blir dock inte av den karaktären att det är väsentligt stora skillnader. För enskilda laster blir resultaten godtyckliga men på grund av att programmet fortfarande räknar med EKS 8 går det att förutsätta att lastkombinering skulle ge felaktiga effekter om partialkoefficienterna inte ändras enligt gällande norm.

En delvis negativ konsekvens av att arbeta med 3D-armering är att modellerna blir tunga att köra om exempelvis alla element skall 3D-armeras, det här ställer i sin tur nya krav på hårdvaran. En lösning till detta att enbart 3D-armera ett element och om det finns flera likadana skulle det gå att hänvisa till denna på ritningar för detaljinformation, då går det ändå att arbeta med precisionen som 3D-armering medför men användaren befrias från tunga modeller.

Vid överföring och analys tar programmet inte hänsyn till att en balk t.ex. är ingjuten i ett bjälklag, det här medför att armeringen som genereras inte går genom bjälklaget. Det löses enkelt genom att lägga till plattans höjd till balkens höjd, om modellen dock används för mängdavgivningar måste betongvolymen justeras för annars kommer det bli för stor mängd då ett snitt mängdas två gånger genom att balken går genom bjälklaget i modellering. Här skulle det krävas någon form av vidareutveckling från utvecklarna att kunna ansluta balkar till golv för platsgjutna delar. Ett annat problem är att kopplingen mellan programmen inte är smart då armering kan ändras utav ritingenjören i Revit men ändringen kommer inte att följa med till beräkningsmodellen i Robot vilket leder till en envägskoppling gällande detaljprojektering vilket inte är gynnsamt.

Ett problem som uppstod när pelaren skulle armeras i fall 3.2 var att en bygel genererades på ett felaktigt sätt på ovankanten. Eftersom enskilda element såsom en betongpelare aldrig analyseras och dimensioneras utan några anslutningar anses det inte vara ett stort problem att felet enbart uppstår för isolerade pelare.

Det har också visat sig att dimensionering av armering i Robot är oberoende av materialegenskaperna i Revit. Oavsett vilken betongklass eller exponeringsklass som väljs i Revit överförs inte den information med modellen helt och hållet när den exporteras till Robot. Därför är det viktigt att materialegenskaperna

modifieras efter önskade behov i Robot för att dimensioneringen ska utföras korrekt.

Sofistik har visat sig vara ett fullgott komplement till RSAL vid generering av armering för betongplattor då konstruktören ändå kan styra programmet efter ingenjörsmässiga metoder. En nackdel är att programmet använder sig av DIN EN 1992 vilket är Eurokoden med den tyska bilagan. Alltså används tyska beräkningsnormer istället för svenska. Filen där de nationella valen görs är fullt redigerar och kan således anpassas efter dem svenska kraven och företagets normer. Eftersom Sofistik meddelar användaren att det saknas armering i kanterna pga. täcksiktet är det något som ingenjören får ta hänsyn till och göra en egen bedömning över.

5.1 Krav på modeller

I och med att armering i balkar exempelvis förskjuts i longitudinell riktning vid analys av enskilda komponenter blir det inte möjligt att enbart plocka ut ett element ur modellen för att dimensionera. Det kommer alltid att behövas ha med definierade stöd med den bredd som är återgiven i Revit-modellen.

Ännu svårare blir det med komplexa strukturer där den geometriska modellen inte alltid stämmer helt överens med analysmodellen. Därför kan det bli problematiskt att använda produktionsmodellen för göra en strukturanalys med. Exempelvis i referensprojektet Kongahälla där betongbalkarna är ingjutna i golvet vilket medför att det skapas en lucka mellan golvet och balken i analysmodellen där dem ej längre sitter ihop. Det blir då svårt att ta fram lasteffekter samt att överföra armering då modellen på något vis måste korrigeras för att bli enhetlig. En lösning kan vara att enbart lyfta ur olika delar för att räkna fram lasteffekter och erforderlig armering, men detta kan bli en tidskrävande process.

I praktiken kommer överföringen enbart att fungera korrekt om produktionsmodellen modelleras med hänsyn till hur analysmodellen samtidigt skapas. Detta leder i sin tur att verktyget enbart fungerar på mindre komplexa konstruktioner, till exempel pelare-balksystem.

5.2 Förslag på framtida studier

Det mesta går att lösa med programmering. Med större programmeringskunskaper blir potentialen att använda Dynamo med Revit större. En idé som finns är att på samma vis som för plattan, läsa av koordinaterna för armering i balkar och på samma sätt använda Dynamo för att skapa armeringen då överföringen inte fungerade helt felfritt. Det här skulle kunna öppna upp möjligheten att använda Robot i större utsträckning och skulle i sin tur tillåta mer komplexa konstruktioner.

Då kostnadsbesparingar och effektivisering tar allt mer plats inom branschen kan kunskaper inom programmering vara nyttigt. En framtida frågeställning kan vara om kurser inom programmering bör ingå i programmet för

Samhällsbyggnadsteknik. Det kan då vara intressant att kolla hur effektiva andra tillvägagångssätt för automatisering kan vara.

Det inbyggda verktyget Macro är ett annat sätt att automatisera olika kommandon som kodas med Revits API. Eftersom både Macro och Dynamo har åtkomst till Revits API kan de utföra samma kommandon. Skillnaden är att Macro har potential att vara ännu effektivare ur ett tidsperspektiv. Därför kan det vara bra att undersöka om Macro kan effektivisera samma automatisering som Dynamo utför. Detta förutsätter dock att användaren har goda kunskaper inom programmering eftersom Macro styrs av ett fritt val av olika programmeringsspråk som C#, Visual Basic .Net, Python, eller Ruby.

För en person med djupare vetskap inom programmering kan en undersökning om Robots API vara till nytta, då det idag inte finns lättillgänglig information om APIet. Det här har troligtvis lett till att det inte finns en variation av paket/noder att tillgå just till Robot.

6 Slutsats

Användarvänligheten mellan Revit och Robot fungerar korrekt i vissa situationer men med avseende på fullständig funktionalitet innehåller kopplingen brister som gör att det inte blir ett användbart verktyg. Samordningen mellan programmen har en avsaknad av funktionalitet när det kommer till överföring av armering för isolerade element såsom plattor och väggar samt olika brister vid överföringen av armering från Robot till Revit.

Med hjälp av Dynamo är det möjligt att komma runt problemen men där finns också brister i form av att informationen som finns att jobba med inte är fullständig för att möjliggöra en effektiv lösning. Begränsningen är främst användarens programmeringskunskaper men också att informationen som finns att hämta mellan programmen är bristfällig.

Med hjälp av Sofistik är det möjligt att använda analysresultaten från Robot för att generera 3D-armering direkt i Revit. Bristerna med det tillvägagångssättet är att programmet använder sig av tyska beräkningsnormer istället för svenska. Det återstår att se om några uppdateringar kommer ske i framtiden som gör tillvägagångssättet direkt applicerbart för svenska projekt.

Automatisk generering och överföring av 3D-armering från analysprogram till ritprogram fungerar idag inte på ett tillfredställande sätt då bristerna är allt för stora och delvis inkonsekventa. Det här innebär att ritingenjören kan behöva lägga mycket tid på manuell handpåläggning. 3D-armering medför också tunga modeller vilket ställer stora krav på datorns hårdvara vilket kan bli en begränsning för större projekt.

7 Referenser

- Autodesk. (den 9 April 2018). *Revit - Robot Integration*. Hämtat från Autodesk Knowledge Network: <https://knowledge.autodesk.com/support/revit-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/ENU/Revit-Analyze/files/GUID-B850E0C3-2314-4FEC-B5D1-A7C0CBDF290F-hm.html>
- Autodesk. (2019a). *Designing with Lists*. Hämtat från Dynamo Primer: https://primer.dynamobim.org/06_Designing-with-Lists/6_designing-with-lists.html
- Autodesk. (den 15 April 2019b). *About the Structural Analytical Model*. Hämtat från Autodesk: <https://knowledge.autodesk.com/support/revit-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/Revit-Analyze/files/GUID-05CA5628-12C6-456C-B0B9-D922D22B67D0-hm.html>
- Autodesk. (den 21 Januari 2020a). *Autodesk Revit overview*. Hämtat från Autodesk: <https://www.autodesk.com/products/revit/overview>
- Autodesk. (den 21 Januari 2020b). *Robot structural analysis*. Hämtat från Autodesk: <https://www.autodesk.com/products/robot-structural-analysis/overview>
- Autodesk. (2020c). *The Revit Connection*. Hämtat från Dynamobim: https://primer.dynamobim.org/08_Dynamo-for-Revit/8-1_The-Revit-Connection.html
- Autodesk. (u.å.). *Working with Revit*. Hämtat från Dynamobim: <https://dynamobim.org/issues/working-with-revit/>
- Boverket. (2019). *Om Boverkets konstruktionsregler, EKS*. Hämtat från <https://www.boverket.se/sv/byggande/regler-for-byggande/om-boverkets-konstruktionsregler-eks/>
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM Handbook - A guide to building information modeling*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Kilkelly, M. (den 8 February 2018). *What Is Dynamo and 5 Reasons You Should be Using It*. Hämtat från Archsmarter: <https://archsmarter.com/what-is-dynamo-revit/>
- Nordstrand, U. (2007). *Byggprocessen*. Stockholm: Liber AB.
- SFS:2010:900. (u.d.). Hämtat från Plan- och bygglag (2010:900): https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/plan--och-bygglag-2010900_sfs-2010-900

- SFS:2011:338. (u.d.). Hämtat från Plan- och byggförordning (2011:338):
https://www.riksdagen.se/sv/dokument-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/plan--och-byggforordning-2011338_sfs-2011-338
- SIS. (2020). *Eurokoder*. Hämtat från Svenska Institutet för Standarder:
<https://www.sis.se/konstruktionoch tillverkning/eurokoder/>
- SOFiSTiK AG. (2020). *Reinforcement Generation*. Hämtat från
<https://www.sofistik.com/products/bim-cad/reinforcement-generation>
- Vilutiene, T. (Augusti 2019). Building Information Modeling (BIM) for Structural Engineering: A Bibliometric Analysis of the Literature. *Advanced BIM Applications in the Construction Industry*, s. 19.

8 Bilagor

Bilaga 1 – Beräkningsgång för balk

INDATA

$$\text{Exponeringsklass} = \text{XS1} \quad l := 9\text{m} \quad g_k := 9 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad q_k := 6.9 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{Betongklass} = \text{C35/45}$$

Tvärsnit

$$h := 0.6\text{m}$$

$$a := \frac{h}{2} = 0.3\text{m}$$

$$b := 0.3\text{m}$$

$$l_{\text{eff}} := a + l + a = 9.6\text{m}$$

Armering

$$f_{yk} := 500\text{MPa}$$

$$\gamma_s := 1.1$$

Betong

$$f_{ck} := 35\text{MPa}$$

$$f_{ctm} := 3.2\text{MPa}$$

$$f_{cd} := \frac{f_{ck}}{1.5} = 23.333\text{MPa}$$

$$f_{td} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 434.783 \times 10^6 \text{Pa}$$

Dimensionerande last

$$q_{Ed} := 1.35g_k + 1.5q_k = 22.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \text{ (Brottgränstillstånd)}$$

$$M_{ed} := \frac{(q_{Ed} \cdot l_{\text{eff}}^2)}{8} = 259.2 \text{kNm}$$

Armeringsbehov

Den effektiva höjden uppskattas till

$$d := 0.5\text{m}$$

Överslagsdimensionering

$$M_{ed} = F_s \cdot Z = \sigma_s \cdot A_s \cdot z \Rightarrow A_s = M_{ed} / \sigma_s \cdot z$$

Antag:

$$\sigma_s := f_{td}$$

$$z := 0.9d$$

$$\phi := 16\text{mm}$$

$$A_{si} := \frac{\pi \cdot \phi^2}{4} = 201.062 \text{mm}^2$$

$$A_s := \frac{M_{ed}}{f_{td} \cdot z} = 1.325 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

$\phi 16$ ger antal

$$n := \frac{A_s}{A_{si}} = 6.589$$

Välj 7st $\phi 16$

$$A_{s\text{fält}} := 7 \cdot A_{si} = 1.407 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$$

Stångplacering

$$c_{dev} := 10\text{mm}$$

$$c_{min.dur} := 30\text{mm}$$

$$c_{nom} := c_{dev} + c_{min.dur} = 0.04\text{m}$$

En stång:

$$c_{min.b} := \phi$$

Huvudarmering :

$$\phi := 16\text{mm}$$

Bygel :

$$\phi_b := 10\text{mm}$$

Kantavstånd med hänsyn till korrosion

$$c := c_{nom} + \frac{\phi}{2} + \phi_b = 58 \times 10^{-3} \text{ m}$$

7 stänger i 2 lager, dvs 4+3

Minsta avstånd mellan stänger

$$k_1 := 1.$$

dg = största stenstorlek i ballasten.

$$k_2 := 5\text{mm}$$

$$dg := 20\text{mm}$$

$$\max(k_1 \cdot \phi, dg + k_2, 20\text{mm}) = 25 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$cc_{avstånd} := 25\text{mm} + 16\text{mm} = 41 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$b_{ny} := (4 - 1) \cdot cc_{avstånd} + 2 \cdot c = 239\text{mm}$$

Vi använder ändå b=300mm för att kunna jämföra med Robots beräkning.

$$d_1 := 600\text{mm} - 58\text{mm} = 542\text{mm}$$

$$d_2 := 600\text{mm} - 58\text{mm} - 41\text{mm} = 501\text{mm}$$

$$x := \left[\frac{4 \cdot c + 3 \cdot (c + cc_{avstånd})}{7} \right] = 75.571\text{mm}$$

Armeringens tyngdpunkt.

$$d_m := h - x = 524.429 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Definitivt tvärsnitt

$$h = 600\text{mm}$$

$$b = 300\text{mm}$$

$$A_{s,min} := b \cdot d_m \cdot 0.26 \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} = 261.795\text{mm}^2$$

$$A_{s,max} := 0.04h \cdot b = 7.2 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^2$$

$$A_s := 7 \cdot A_{si} = 1.407 \times 10^{-3} \cdot \text{m}^2$$

$$A_{s,min} < A_s < A_{s,max} = 1 \times 10^0$$

OK!

Tvärsnittskonstanter

Tryckblocksfaktorer ur Tabell B5.1 (Bärande konstruktioner del 1)

$$\alpha := 0.81$$

$$\beta := 0.41$$

$$F_s := A_s \cdot f_{td} = 576\text{kN}$$

$F_s = F_c$, statisk jämvikt, lös ut x .

$$F_c := \alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x$$

$$x := \frac{A_s \cdot f_{td}}{\alpha \cdot f_{cd} \cdot b} = 101.587 \text{ mm}$$

$$M_{Rd} := \alpha \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x \cdot (d_m - \beta \cdot x) = 277.729 \text{ kNm}$$

$$M_{ed} = 259.2 \text{ kNm}$$

$$\text{Utnyttjandegrad} := \frac{M_{ed}}{M_{Rd}} = 0.933$$

Kryptal

$$h := 600 \text{ mm}$$

$$b := 300 \text{ mm}$$

Ålder vid pålastning: 28 dagar

Betongklass: N

$$RH := 65$$

$$\text{third } d_{\text{root } 200} := 5.8480$$

$$\beta_{fcm} := 2.5$$

Tabell B2.9

$$\beta_{to} := 0.4$$

Fig B2.20

$$A_c := b \cdot h = 0.18 \text{ m}^2$$

$$u := 2 \cdot (b + h) = 1.8 \text{ m}$$

$$h_0 := 2 \cdot \frac{A_c}{u} = 0.2 \text{ m}$$

$$\varphi_{RH} := \left[1 + \left[\left(\frac{1 - \frac{RH}{100}}{0.1584803} \right) \cdot \left(\frac{35}{43} \right)^{0.7} \right] \right] \cdot \left(\frac{35}{43} \right)^{0.2} = 1.457$$

$$\varphi := \varphi_{RH} \beta_{fcm} \beta_{to} = 1.79$$

Slutgiltigt kryptal

Materialstyheter

$$\phi := 16 \text{ mm}$$

$$E_s := 200 \text{ GPa}$$

$$E_c := 34 \text{ GPa}$$

$$A_{si} := \phi^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 2.011 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_{s1} := A_{si} \cdot 4 = 8.042 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_{s2} := A_{si} \cdot 3 = 6.032 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\alpha_{ef} := \left(\frac{E_s}{E_c} \right) \cdot (1 + \varphi) = 16.413$$

$$M_{\max} := 256 \text{ kNm}$$

$$c_{\text{nom}} := 58 \text{ mm}$$

$$E_{c_{ef}} := \frac{E_c}{1 + \varphi} = 12.185 \text{ GPa}$$

$$c_c := 41 \text{ mm}$$

$$d_1 := h - c_{\text{nom}} = 0.542\text{m}$$

$$d_2 := h - c_{\text{nom}} - cc = 0.501\text{m}$$

Ytmomentjämvikt

$$x := 0.2\text{m}$$

$$\text{root}\left[-A s_1 \cdot \alpha_{\text{ef}} \cdot (d_1 - x) - A s_2 \cdot \alpha_{\text{ef}} \cdot (d_2 - x) + b \cdot x \cdot \frac{x}{2}, x\right] = 0.217\text{m}$$

$$x := 0.217\text{m}$$

Yttröghetsmoment

$$I_{\text{II}} := \left(b \cdot \frac{x^3}{3}\right) + \alpha_{\text{ef}} \cdot A s_1 \cdot (d_1 - x)^2 + \alpha_{\text{ef}} \cdot A s_2 \cdot (d_2 - x)^2 = 3.215 \times 10^{-3} \text{m}^4$$

Nedböjning med elementarfall

$$W_1 := 9 \frac{\text{kN}}{\text{m}} + 6.9 \frac{\text{kN}}{\text{m}} = 15.9 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$L := 9\text{m}$$

$$p1 := \frac{(W_1 \cdot 5 \cdot L^4)}{384 E_{\text{cf}} \cdot I_{\text{II}}} = 34.672\text{mm}$$

Bilaga 2 – Beräkningsrapport från Robot

1 Level:

- Name :
- Reference level : ---
- Maximum cracking : 0,30 (mm)
- Exposure : XS1
- Concrete creep coefficient : $\varphi_{\pi} = 1,69$
- Cement class : N
- Concrete age (loading moment) : 28 (days)
- Concrete age : 5 (years)
- Concrete age after erecting a structure : 365 (years)
- Structure class : S1
- Fire resistance class : no requirements
- FFB Recommendations 7.4.3(7) : 0,00

2 Beam: Beam1 of identical elements: 1

Number

2.1 Material properties:

- Concrete : C35/45 $f_{ck} = 35,00$
(MPa)
Rectangular stress distribution [3.1.7(3)]
Density : 2501,36 (kg/m³)
Aggregate size : 20,0 (mm)
- Longitudinal reinforcement: : B500BT $f_{yk} = 500,00$
(MPa)
Horizontal branch of the
stress-strain diagram
Ductility class : A
- Transversal reinforcement: : B500BT $f_{yk} = 500,00$
(MPa)
Horizontal branch of the
stress-strain diagram
Ductility class : A
- Additional reinforcement: : B500BT $f_{yk} = 500,00$
(MPa)
Horizontal branch of the
stress-strain diagram

2.2 Geometry:

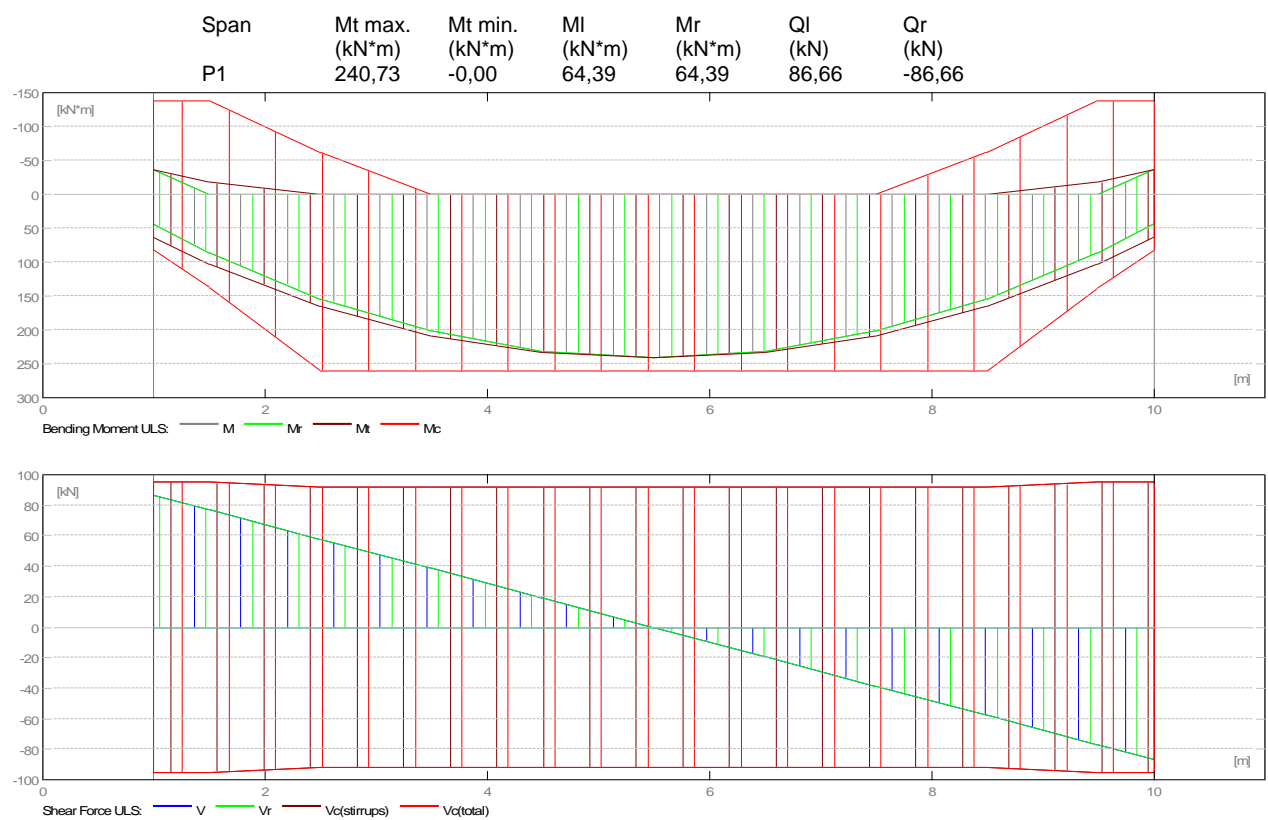
2.2.1	Span	Position	L supp. (m)	L (m)	R supp. (m)
	P1	Span 1,00	9,00	1,00	
	Span length: $L_0 = 10,00$ (m)				
	Section from 0,00 to 9,00 (m)				
	30,0 x 60,0 (cm)				
	without left slab				
	without right slab				

2.3 Calculation options:

- Regulation of combinations : SS-EN 1990/A1:2005 SC2
- Calculations according to : EN 1992-1-1/BFS 2011:10 EKS8
- Seismic dispositions : No requirements
- Precast beam : no
- Cover : bottom $c = 4,0$ (cm)
: side $c_1 = 4,0$ (cm)
: top $c_2 = 4,0$ (cm)
- Cover deviations : $C_{dev} = 1,0$ (cm), $C_{dur} = 0,0$ (cm)
- Coefficient $\beta_2 = 0.50$: long-term or cyclic load
- Method of shear calculations : strut inclination

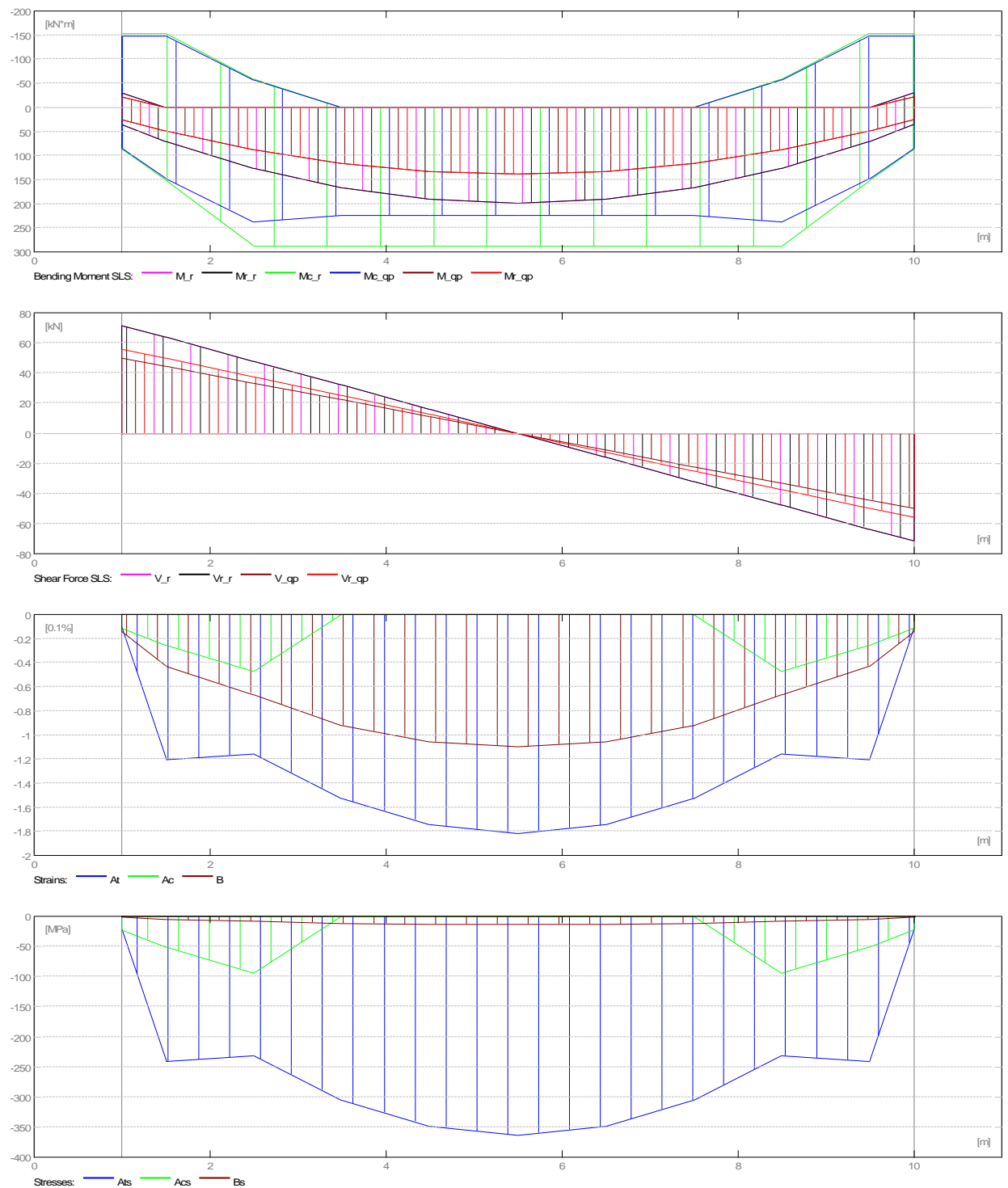
2.4 Calculation results:

2.4.1 Internal forces in ULS



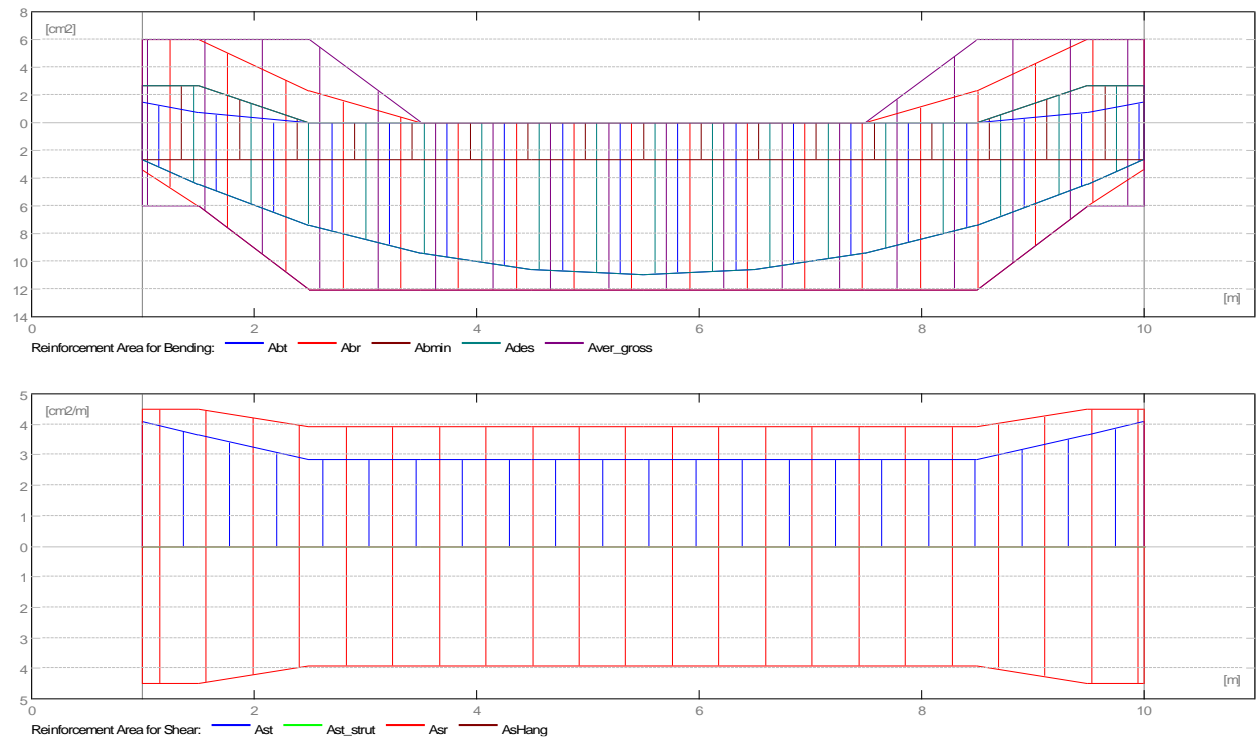
2.4.2 Internal forces in SLS

Span	Mt max. (kN*m)	Mt min. (kN*m)	MI (kN*m)	Mr (kN*m)	Ql (kN)	Qr (kN)
P1	198,75	0,00	35,78	35,78	71,55	-71,55



2.4.3 Required reinforcement area

Span	Span (cm ²)		Left support (cm ²)		Right support (cm ²)	
	bottom	top	bottom	top	bottom	top
P1	10,94	0,00	2,68	1,49	2,68	1,49



2.4.4 Deflection and cracking

wt(QP) Total due to quasi-permanent combination

wt(QP)dop Allowable due to quasi-permanent combination

Dwt(QP) Deflection increment from the quasi-permanent load combination after erecting a structure.

Dwt(QP)dop Admissible deflection increment from the quasi-permanent load combination after erecting a structure.

wk - width of perpendicular cracks

Span	wt(QP) (cm)	wt(QP)dop (cm)	Dwt(QP) (cm)	Dwt(QP)dop (cm)	wk (mm)
P1	3,7	4,0	0,8	2,0	0,2

2.5 Theoretical results - detailed results:

2.5.1 P1 : Span from 1,00 to 10,00 (m)

Abscissa (m)	ULS		SLS		A bottom (cm ²)	A top (cm ²)
	M max. (kN*m)	M min. (kN*m)	M max. (kN*m)	M min. (kN*m)		
1,00	64,39	-36,11	35,78	-29,81	2,68	1,49
1,50	103,04	-17,55	71,55	0,00	4,47	0,74
2,50	165,77	-0,00	127,20	0,00	7,37	0,00
3,50	209,24	-0,00	166,95	0,00	9,42	0,00
4,50	233,45	-0,00	190,80	0,00	10,59	0,00
5,50	240,73	0,00	198,75	0,00	10,94	0,00
6,50	233,45	-0,00	190,80	0,00	10,59	0,00
7,50	209,24	-0,00	166,95	0,00	9,42	0,00
8,50	165,77	-0,00	127,20	0,00	7,37	0,00
9,50	103,04	-17,55	71,55	0,00	4,47	0,74
10,00	64,39	-36,11	35,78	-29,81	2,68	1,49

Abscissa (m)	ULS		afp (mm)
	V max. (kN)	V max. (kN)	
1,00	86,66	71,55	0,0
1,50	77,04	63,60	0,0
2,50	57,78	47,70	0,1

3,50	38,52	31,80	0,2
4,50	19,26	15,90	0,2
5,50	0,00	0,00	0,2
6,50	-19,26	-15,90	0,2
7,50	-38,52	-31,80	0,2
8,50	-57,78	-47,70	0,1
9,50	-77,04	-63,60	0,0
10,00	-86,66	-71,55	0,0

2.6 Reinforcement:

2.6.1 P1 : Span from 1,00 to 10,00 (m)

Longitudinal reinforcement:

- bottom (B500BT)

3	φ16	l = 9,47	from 0,76	to	10,24
3	φ16	l = 7,26	from 1,87	to	9,13
- assembling (top) (B500BT)

2	φ10	l = 6,94	from 2,03	to	8,97
---	-----	----------	-----------	----	------
- support (B500BT)

6	φ16	l = 2,48	from 0,25	to	2,73
---	-----	----------	-----------	----	------

Transversal reinforcement:

- main (B500BT)

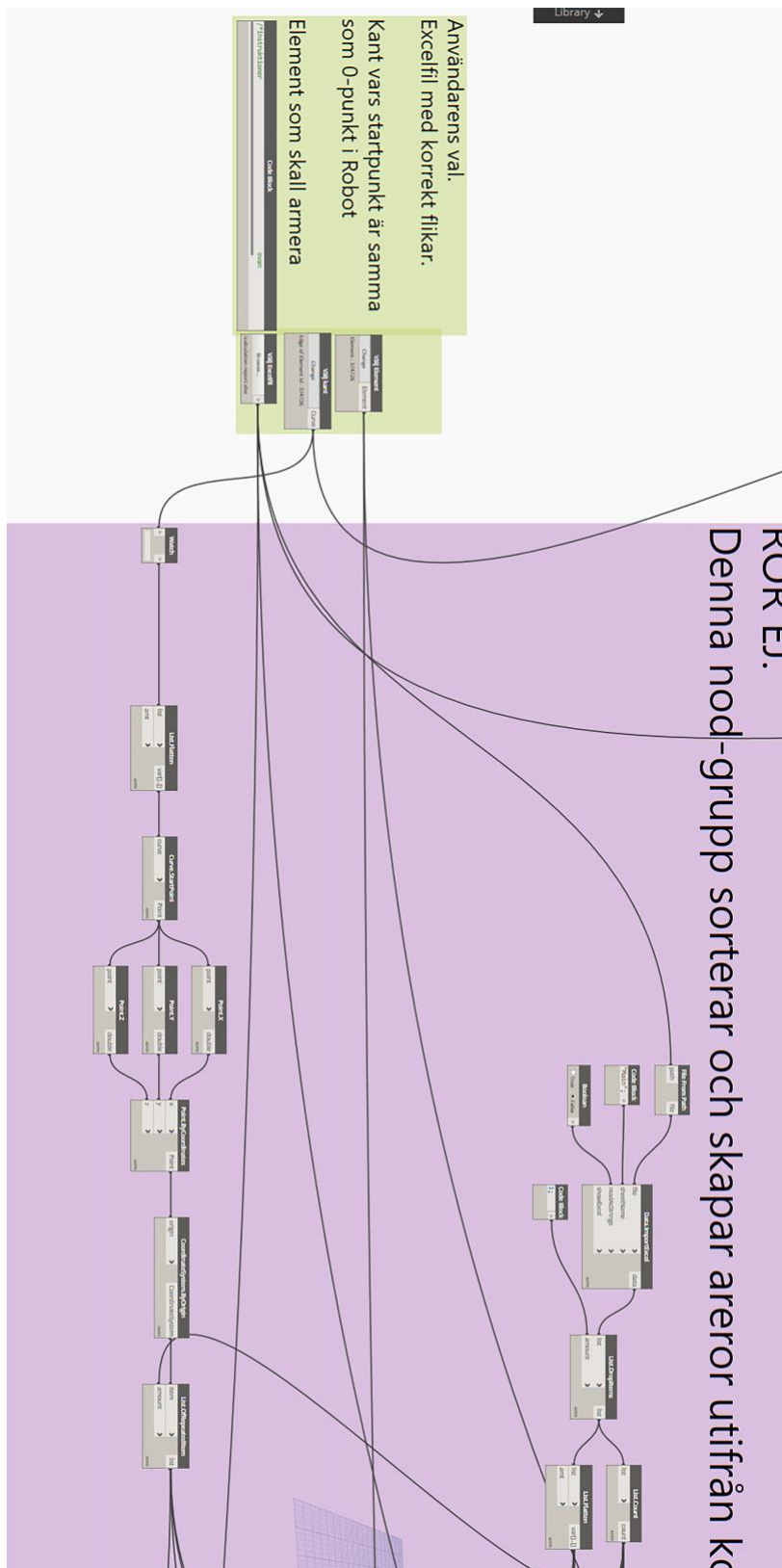
stirrups	23	φ10	l = 1,66
e = 1*0,20 + 2*0,35 + 18*0,40 + 2*0,35 (m)			

3 Material survey:

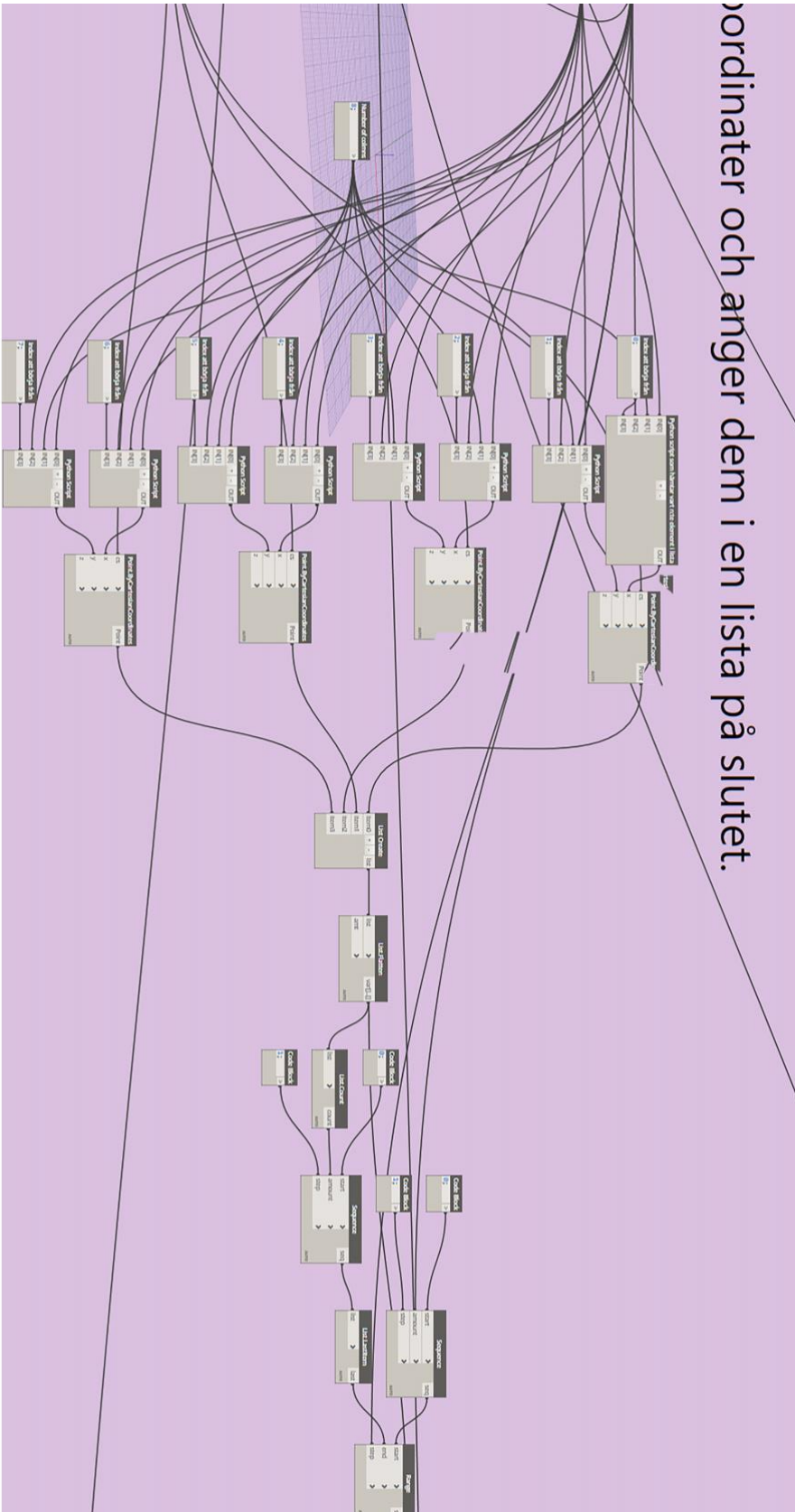
- Concrete volume = 1,98 (m3)
- Formwork = 16,26 (m2)
- Steel B500BT
 - Total weight = 134,90 (kG)
 - Density = 68,13 (kG/m3)
 - Average diameter = 13,3 (mm)
 - Survey according to diameters:

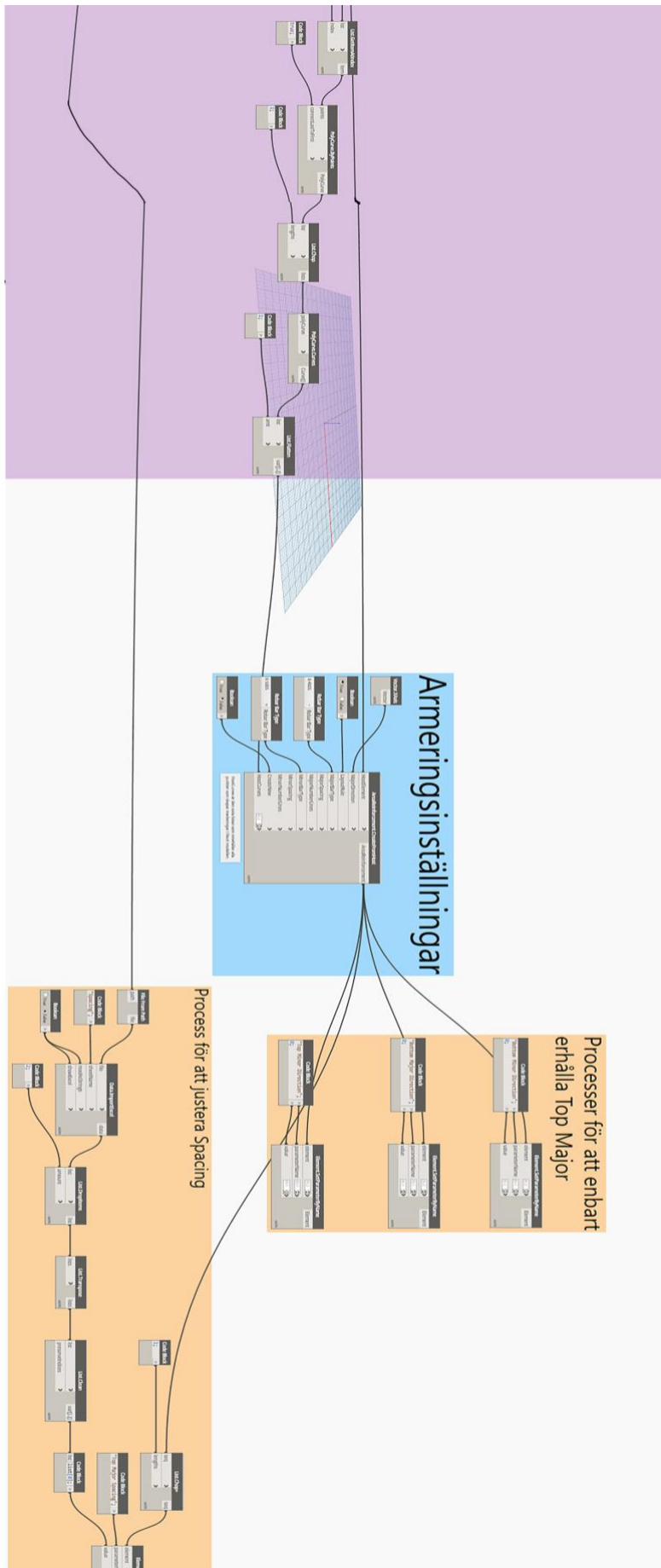
Diameter (mm)	Length (m)	Weight (kG)	Number (No.)	Total weight (kG)
10	1,66	1,03	23	23,61
10	6,94	4,28	2	8,56
16	2,48	3,91	6	23,48
16	7,26	11,46	3	34,39
16	9,47	14,95	3	44,86

Bilaga 3 – Dynamo script för golvarmering



koordinater och anger dem i en lista på slutet.





Bilaga 4 – Modifierad nod-kod

*#Create area reinforcement in a Floor or Wall
#Authored by Dieter Vermeulen, Autodesk, 2016
#http://revitbeyondbim.wordpress.com*

```
import clr

clr.AddReference('RevitAPI')
from Autodesk.Revit.DB import *
from Autodesk.Revit.DB.Structure import *

clr.AddReference("System")
from System.Collections.Generic import List

clr.AddReference('RevitNodes')
import Revit
clr.ImportExtensions(Revit.GeometryConversion)
clr.ImportExtensions(Revit.Elements)

clr.AddReference('RevitServices')
import RevitServices
from RevitServices.Persistence import DocumentManager
from RevitServices.Transactions import TransactionManager

doc = DocumentManager.Instance.CurrentDBDocument

#Preparing input from dynamo to revit
host = UnwrapElement(IN[0])
bartype = UnwrapElement(IN[1])
vector=IN[2]
#Toggle that indicates if a new element has to be created
new=IN[3]
#creating curve array for outline:
l = [i.ToRevitType(True) for i in IN[4]]
crvarray = List[Curve](l)
TransactionManager.Instance.EnsureInTransaction(doc)
# Get the host analytical profile whose curves will define the
boundary of the the area reinforcement
analytical = host.GetAnalyticalModel()
if not analytical:
    rebar= "The selected element can't \nhost Area Reinforcement"

else:
    #define the Major Direction of AreaReinforcement,
    #if there is no Major Direction given in the inputs, then
    take the direction of the first curve of the floor/wall sketch.
    if vector is None:
        curves =
analytical.GetCurves(AnalyticalCurveType.ActiveCurves)
```

```

        firstLine = curves[0]
        majorDirection = XYZ(
            firstLine.GetEndPoint(1).X -
firstLine.GetEndPoint(0).X,
            firstLine.GetEndPoint(1).Y -
firstLine.GetEndPoint(0).Y,
            firstLine.GetEndPoint(1).Z -
firstLine.GetEndPoint(0).Z)
        #else use the given vector
        else:
            majorDirection=vector.ToXYZ()

#Obtain the default Area Reinforcement Type
defaultAreaReinforcementTypeId =
doc.GetDefaultElementTypeId(ElementTypeGroup.AreaReinforcement
Type)
    if str(defaultAreaReinforcementTypeId) == "-1":
        rebar= "There is no Area Reinforcement Family Type
\ndefined in the Revit project"
    else:
        #Set the default Hook Type to none
        HookTypeId = ElementId.InvalidElementId
        try:
            rebar = AreaReinforcement.Create(doc,
host,crvarray, majorDirection, defaultAreaReinforcementTypeId,
bartype.Id, HookTypeId).ToDSType(new)
        except:
            rebar= "The Area Reinforcement could \nnot be
created"

#Assign your output to the OUT variable

TransactionManager.Instance.TransactionTaskDone()

OUT=rebar

```