

Morten Knudsen

Fikre Yeman Beyene

Hvordan bruke FEM-analyseprogram for generering av 3D-armering i Revit

Bacheloroppgave i Bacheloroppgave i Byggingeniør
Veileder: Bartosz Siedziako
Mai 2024

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for havromsoperasjoner og byggteknikk



Kunnskap for en bedre verden

TITTEL:**Hvordan bruke FEM-analyseprogram for generering av 3D-armering i Revit****KANDIDATNUMMER(E):****Morten Knudsen****Fikre Yeman**

DATO: 21.06.2024	EMNEKODE: BYGA2900	EMNE: Bacheloroppgave	DOKUMENT TILGANG: Åpen
STUDIUM: Bachelor i ingeniørfag- Konstruksjonsteknikk	ANT SIDER/VEDLEGG: 110/390	BIBL. NR:	

VEILEDER(E):

NTNU: Bartosz Siedziako

Dr. techn. Olav Olsen AS: Thomas Berglid

SAMMENDRAG:

Formålet med oppgaven var å utforske bruken av Finite Element Method (FEM)-analyseprogrammer SOFiSTiK og RAM Structural System med BIM-verktøyet Revit, spesielt med tanke på generering og automatisering av armeringsdesign i betongkonstruksjoner. Oppgaven utforsket potensialet i å bruke SOFiSTiK og RAM til å generere og automatisere armeringsdesign samt integreringen med BIM-verktøyet Revit, og hvordan disse programvarene og integrasjonen kan forbedre effektiviteten og nøyaktigheten i armeringsdesignprosessen.

En grundig gjennomgang av brukermanualer for SOFiSTiK og RAM Structural System ble gjennomført for å bygge et solid teoretisk grunnlag. Deretter ble programmenes funksjonalitet testet i praksis. Videre ble Case-studier brukt for å finne ut programvarenes helhetlige potensial med tanke på generering og automatisering av armering, samt integrasjon med Revit, og deretter vurdere dette potensialet.

Utforskningen viste at begge programvarene kan generere 3D-armering for en betongkonstruksjon basert på FEM-analysen av konstruksjonen. Likevel er det kun SOFiSTiK som kan generere for en hel konstruksjon. RAM Structural System har ikke funksjonalitet for takplater og dekker. Når det gjelder automatisering av de genererte armeringene i modellen, er det kun RAM Structural System som har mulighet til dette. Når det gjelder integrasjon med Revit, er det kun SOFiSTiK som er direkte integrert i Revit, mens RAM Structural System integreres med Revit ved bruk av tredjepartsverktøyet iTwin.

SOFiSTiK og RAM Structural System har begge styrker som gjør dem godt egnet til å effektivisere armeringsdesignprosesser og øke nøyaktigheten i konstruksjonsprosjekter. SOFiSTiK er spesielt egnet for komplekse og presisjonskrevende prosjekter med langtidsdokumentasjon på grunn av sin detaljerte analyse. Der detaljanalyse av konstruksjoner er utført ved bruk av en annen programvare, kan RAM Structural System være nyttig og tidssparende for prosjekter hvor rask beregning av mengde armering for bjelker og søyler er nødvendig uten detaljanalyse av konstruksjonen.

Denne oppgaven er en eksamensbesvarelse utført av studenter ved NTNU i Ålesund.

FORORD

Denne bacheloroppgaven er en del av vår ingeniørutdanning ved NTNU i Ålesund. Fokuset har vært på potensialet for SOFiSTiK og RAM-Structural System for generering og automatisering av armeringsdesign, i tillegg til hvordan disse programvarene integreres med BIM-verktøy Revit. Vi valgte dette temaet på grunn av den økende bruken av BIM-teknologi i byggebransjen og behovet for effektive verktøy for armeringsdesign.

Vi vil uttrykke vår takknemlighet til Dr. techn. Olav Olsen AS for å ha vært vår oppdragsgiver. En stor takk går også til Thomas Berglid, vår veileder hos Dr. techn. Olav Olsen, for hans gode veiledning og tilgjengelighet gjennom hele prosjektet

I tillegg vil vi også rette en spesiell takk til vår veileder Bartosz Siedziako. Hans faglige kompetanse og veiledning har hjulpet oss med å sikre at vi holdt en høy faglig standard i vårt arbeid.

Til slutt vil vi takke NTNU i Ålesund for å ha gitt oss muligheten til å gjennomføre prosjektet og for å ha gitt oss de nødvendige ressursene og fasilitetene.

Vi håper at denne oppgaven kan bidra til videre forskning og utvikling innenfor integrasjon av FEM-analyseprogrammer med BIM-verktøy.

Innholdsfortegnelse

SAMMENDRAG	1
BEGREPER	3
FORKORTELSER	4
1. INNLEDNING	5
1.1 PROBLEMSTILLINGEN	5
1.2 AVGRENSNING	6
2 TEORETISK GRUNNLAG.....	7
2.1 DESIGNPROSESS.....	7
2.1 DIMENSJONERING AV BETONGKONSTRUKSJONER ETTER KRAV AV EUROKODE 2	8
2.2 FEM (FINITTE ELEMENTMETODEN)	8
2.3 ANALYTISK MODELL.....	8
2.4 PROGRAMVARE.....	9
2.4.1 Revit	9
2.4.2 Revit structure.....	10
2.4.3 Revit Analyze.....	10
2.5 SOFiSTiK.....	11
2.5.1 SOFiSTiK Analysis + Design	12
2.5.2 SOFiSTiK verktøyene som blir bruk i oppgaven:.....	12
2.5.3 Analysis:	13
2.5.4 SOFiSTiK Analytical Model Generator.....	13
2.5.5 SOFiSTiK Analysis	14
2.5.6 SOFiSTiK Design.....	17
2.5.6.1 Column Design	18
2.5.6.2 Beam Design.....	19
2.5.6.3 Slab Design.....	21
2.6 BENTLEY SYSTEMS.....	22
2.6.1 Hovedprogrammer for analyse og design RAM-familie	22
2.6.2 iTwin Analytical Synchronizer.....	22
2.6.3 RAM Structural System.....	23
2.6.4 RAM Manager.....	24
2.6.5 RAM Modeler.....	25
2.6.6 RAM Concrete.....	26
2.6.6.1 Concrete Analysis	26
2.6.6.2 Concrete Beam.....	27
2.6.6.3 Concrete Column	29
2.6.7 Eksportering av modell fra RAM-Structural System.....	31
2.6.8 Importering til Revit.....	31
2.7 RESULTATVISNING OG ARMERINGS SJEKKER	31
2.7.1 SOFiSTiK.....	32
2.7.1.1 Analyseresultater (Interne Krefter og Forskyvninger):	32
2.7.1.2 Designresultater (Armering):	33
2.7.1.3 Armerings sjekker:	34
2.7.2 RAM-Structural System.....	35
2.7.2.1 Analyseresultater	35
2.7.2.2 Armeringsdesign	36
2.7.2.3 SOFiSTiK Reinforcement.....	37
3 MATERIALER OG METODE.....	38

3.1	METODE	38
3.2	CASE-STUDIER	39
3.2.1	Formål med testing:	39
3.3	MATERIALER	40
3.4	FRAMGANGSMÅTEN	40
3.4.1	Beskrivelse av basis modulær enheten	40
3.4.2	Framgangsmåte mellom Revit og SOFiSTiK	42
3.4.2.1	Frittopplagte bjelke	43
3.4.2.2	Dimensjonering av bjelken for armering	46
3.4.2.3	Håndberegning	48
3.4.3	Basis modulær enhet	49
3.4.3.1	Design prosedyre av de ulike deler av basis modulær enheten	49
3.4.3.2	Design av søylearmering	50
3.4.3.3	Design av bjelkearmering	52
3.4.3.4	Design av takplatearmering	54
3.4.3.5	Visualisering av resultatene og plassering av armering på modellen	57
3.4.3.6	Plassering av armering på modellen	59
3.4.4	Framgangsmåte RAM-Structural System	61
3.4.4.1	Rammekonstruksjon	61
3.4.4.2	Basis modulær enhet	66
4	RESULTATER	70
4.1	GENERERING ARMERING OG BEREGNINGSGRUNNLAG FOR ARMERING	70
4.1.1	SOFiSTiK	70
4.1.2	RAM-Structural System	72
4.2	VISUALISERING AV RESULTAT	74
4.2.1	SOFiSTiK	74
4.2.2	RAM-Structural System	74
4.2.2.1	Analyseresultater	74
4.2.2.2	Designresultater	75
4.3	OPTIMALISERING OG NØYAKTIGHET	75
4.3.1	SOFiSTiK	76
4.3.2	RAM Structural System	77
4.4	AUTOMATISERING AV 3D-ARMERING I MODELLEN	78
4.5	INTEGRASJONEN MED REVIT	79
4.6	BRUKERVENNLIGHET	80
4.6.1	SOFiSTiK	80
4.6.2	RAM-Structural System	80
5	DRØFTING	80
5.1	GENERERING AV NØDVENDIGARMERING, OG OM DET KAN ANSES SOM 3D-ARMERING	81
5.1.1	SOFiSTiK	81
5.1.2	RAM Structural System	83
5.1.3	Oppsummering og sammenligning av SOFiSTiK og RAM-Structural System	86
5.2	INTEGRASJONEN MED BIM-VERKTØYET REVIT	87
5.3	VISUALISERING	89
5.3.1	SOFiSTiK	90
5.3.2	RAM Structural System	91
5.3.3	Oppsummering og sammenligning av visualiseringen	93
5.4	METODEN	94
6	KONKLUSJON OG VIDERE ARBEID	95

6.1 VIDERE ARBEID.....	97
7 REFERANSER	98
VEDLEGG	102

Figurliste

FIGUR 1:MODELLERING AV BETONGKONSTRUKSJON OG DESIGNING AV ARMERING I REVIT STRUCTURE.....	10
FIGUR 2:AUTOMATISERING AV ANALYTISK MODELL I REVIT VED BRUK AV DYNAMO	11
FIGUR 3:SOFISTIK VERKTØYET I REVIT	12
FIGUR 4: SOFISTIK ULIKE INNSTILLIGSFANER I REVIT	13
FIGUR 5: FORBEREDELSE OG LAGING AV ANALYTISK MODELL VED BRUK AV REVIT ANALYZE OG SOFISTIK ANALYTICAL MODEL GENERATOR. .	13
FIGUR 6:LAGING AV ANALYTISK MODELL I REVIT VED BRUK AV SOFISTIK ANALYTISK MODELL GENERATOR.....	14
FIGUR 7:SJEKING OG VALG AV MATERIAL FOR MODELLEN VED BRUK AV SOFISTIK MATERIAL MAPPING I REVIT	14
FIGUR 8:SJEKING OG VALG AV TVERRSNITT FOR MODELLEN VED BRUK AV SOFISTIK CROSS SECTION MAPPING I REVIT	15
FIGUR 9:BESTEMMELSE AV LASTENE SOM SKAL BLI MED I ANALYSE GÅR I ACTION MAPPING	15
FIGUR 10: ANALYSE KONFIGURASJON AV SOFISTIK SOM DUKKER OPP NÅR MAN STARTER ANALYSE	16
FIGUR 11: FANEN SOM DUKKER OPP ETTER ANALYSEN VISER ENTEN ANALYSEN VAR SUKSESSFULL ELLER DET ER NOE ADVARSEL	16
FIGUR 12:SOFISTIK DESIGN VERKTØYSETT INTEGRERT I REVIT.....	17
FIGUR 13:SOFISTIK DESIGN TO HJELPE-PANELER	17
FIGUR 14:EKSEMPELVIS AV HVORDAN RESULTATENE SER UT.....	18
FIGUR 15: DESIGNKONFIGURASJONSDIALOGEN SOM DUKKER OPP ETTER VALG AV COLUMN IKON FRA DESIGN VERKTØYET	19
FIGUR 16:DESIGNKONFIGURASJONSDIALOGEN SOM DUKKER OPP ETTER VALG AV BEAM IKON FRA DESIGN VERKTØYET	20
FIGUR 17: DESIGNKONFIGURASJON SOM BRUKES FOR Å BESTEMME VIRKINGEN AV DESIGNRESULTATER PÅ TAKPLATE	21
FIGUR 18: VED EKSPORTERING AV MODELL FRA REVIT OPPRETTES ET ISM REPOSITORY VED Å TILEGNE MATERIALER OG TVERRSNITT TIL ITWIN SITT BIBLIOTEK.....	23
FIGUR 19:BESTEMMELSE AV MATERIALEGENSKAPER FOR SØYLE I RAM MODELER.....	25
FIGUR 20: DIALOGBOKSEN FOR VALG AV BYGGEKODER	26
FIGUR 21: FREMDRIFTSLOGGEN VED BRUK AV ANALYZE	27
FIGUR 22: KRITERIER FOR BJELKEARMERING HVOR OVERDEKNING, STØRRELSER OG AVSTANDER LEGGES INN	28
FIGUR 23: OPPRETTELSE AV LASTKOMBINASJONER BASERT PÅ BYGGEKODER.....	29
FIGUR 24: KRAV FOR STØRRELSER OG ARMERINGSMØNSTER LEGGES INN UNDER CRITERIA	30
FIGUR 25: VISUALISERING AV MODELLEN I ITWIN VED OVERFØRING FRA RAM-STRUCTURAL SYSTEM	31
FIGUR 26:SLIK VISER SOFISTIK RESULTATENE AV DE INTERNE KREFTER I REVIT.	32
FIGUR 27:VISNING AV BJELKENS ARMERING RESULTATER FRA SOFISTIK.....	33
FIGUR 28: SOFISTIK VISNINGSVERKTØY UTENFOR REVIT.....	34
FIGUR 29: SOFISTIK ARMERING SJEKKER VISNINGS MULIGHET	34
FIGUR 30: VISUALISERING AV MEMBER FORCES DISTRIBUTERINGEN AV KREFTER ETTER ANALYSEN	35
FIGUR 31: VISUALISERING AV FORSKYVNINGENE ETTER ANALYSEN	36

FIGUR 32: FUNKSJONEN VIEW/UPDATE HVOR RESULTAT AV ARMERINGSDESIGN OG EVENTUELLE ENDRINGER AV DETTE KAN UTFØRES.....	37
FIGUR 33: BASIS MODULÆR ENHET SOM BLE LAGD I REVIT	41
FIGUR 34: BASIS MODULÆR ENHET SOM BLE LAGD I RAM MODELER	41
FIGUR 35: FRITTOPPLAGT BJELKEN OG TILHØRENDE LAST FRA REVIT.....	43
FIGUR 36: VALG AV RESULTATS INNHOLD	43
FIGUR 37: VALG AV RESULTATS INNHOLD	43
FIGUR 38: VALG AV RESULTATS INNHOLD	43
FIGUR 39: VALG AV RESULTATS INNHOLD	43
FIGUR 41: VALGTE KODE FOR ANALYSE	43
FIGUR 41: OTHER CODES AND ADVANCED SETTINGS TAR OSS TIL Å VELGE ANALYSE KODE SOM VI VIL BRUKE	43
FIGUR 42: DET BLE VALGT B35 AV BETONGTYPE FOR BJELKEN	44
FIGUR 43: TVERRSNITTET SOM BLE VALGT I REVIT VAR RIKTIG TOLKET AV SOFISTIK.....	44
FIGUR 44: VI BESTEMTE AT VI HADDE KUN PERMANENTLAST PÅ BJELKEN	44
FIGUR 45: HER SER VI AT ANALYSEN VAR SUKSESSFULLT	45
FIGUR 47: START KNAPPEN FOR ANALYSEN	45
FIGUR 47: VALG AV DET NØDVENDIGE FAKTORER SOM VI FORVENTER FOR AT SOFISTIK SKAL FORSTÅ.....	45
FIGUR 48: BJELKES DESIGNKONFIGURASJON.	46
FIGUR 49: ARRANGERING AV ARMERING FØR DESIGNPROSESSEN.....	46
FIGUR 50: ANALYSIS TASK MONITOR ETTER DESIGN.....	47
FIGUR 51: ADVARSEL VI FIKK AT NS-EC2 IKKE BLE BENYTTET FOR DESIGNGRUNNLAG.....	47
FIGUR 52: RESULTAT AV NØDVENDIG ARMERING VED BRUK AV HÅNDBEREGNING.....	48
FIGUR 53: ENHETEN VIST I ANALYTISK MODELLFORM MED PÅLAGTE LASTER	49
FIGUR 54: EKSEMPELVIS AV ANALYSERESULTATS INNHOLD.	50
FIGUR 55: GRAFISK VISNING AV SØYLENE SOM PÅKJENT AV MOMENT OG AKSIALKRAFT SAMTIDIG	51
FIGUR 56: I ØVERSTE TABELL SER VI HVILKEN LASTKOMBINASJON SOM VAR AVGJØRENDE OG I DEN ANDRE TABELL SER VI DE TILHØRENDE DIMENSJONERENDE LASTER. TABELLENE ER FRA DESIGNRESULTAT AV SØYLEN.....	51
FIGUR 57: FORESLÅTT NØDVENDIG ARMERING AV SØYLENE FOR MODULÆRENHET FRA SOFISTIK.....	52
FIGUR 58: GRAFISK VISNING AV BJELKEN FRA RESULTATRAPPORTEN UNDER DE BELASTENDE KARAKTERISKE MOMENTER OG SKJÆRKREFTER.....	53
FIGUR 59: DETTE BILDET ER ET EKSEMPEL PÅ HVORDAN TABELLEN PRESENTERES I RAPPORTEN MED DE DIMENSJONERENDE KREFTER LANGS BJELKESPENNET.	53
FIGUR 60: GRAFISK VISNING AV BJELKEN FRA RESULTATRAPPORTEN UNDER DE BELASTENDE DIMENSJONERENDE MOMENTER.....	54
FIGUR 61: SKJERMBILDET VISER ET EKSEMPEL PÅ HVORDAN DESIGNRESULTATENE FOR TAKPLATEN FORMIDLES. RAPPORTEN VISER TYDELIG AT ANALYSEN SOM BLE BRUKT FOR ARMERINGSDESIGNET ER I SAMSVAR MED EC2 ULS.....	55
FIGUR 62: SKJERMBILDET VISER ET EKSEMPEL PÅ HVORDAN ARMERINGSDESIGNRESULTATENE FOR TAKPLATEN ARRANGERES.....	55
FIGUR 63: SKJERMBILDET VISER ET EKSEMPEL PÅ HVORDAN ARMERINGSDESIGNRESULTATENE FOR TAKPLATEN FORMIDLES.	56
FIGUR 64: SKJERMBILDET VISER ET EKSEMPEL PÅ HVORDAN VI FÅR ORDFORKLARINGEN FRA PROGRAMVAREN MED I DESIGNRESULTATRAPPORTEN.	56

FIGUR 65: SKJERMBILDET VISER ET EKSEMPEL PÅ HVORDAN VI FÅR RELEVANTE FORKLARINGEN, ADVARSEL OG INFORMASJON OM ØKNINGEN AV ARMERINGEN FRA ULS TIL SLS.	57
FIGUR 66: MOMENTFORDELINGEN PÅ BJELKENE PÅ GRUNN AV PERMANENTLAST	57
FIGUR 67: FARGEKODE OG TALLVERDI BASERT VISUALISERING AV MOMENTER PÅ TAKPLATEN	58
FIGUR 68: FORDELING AV SKJÆRARMERING PÅ BJELKENE	58
FIGUR 69: FORDELING AV ARMERINGEN I UNDERKANT AV TAKPLATEN	59
FIGUR 70: ARMERING OG DETALJERING AV ARMERINGEN BLE GJORT VED BRUK AV REVIT OG SOFISTIK REINFORCEMENT	59
FIGUR 71: VERKTØYET VISER LEVERT ARMERINGENE PÅ MODELLEN	60
FIGUR 72: VERKTØYET VISER LEVERT ARMERINGEN MINUS DESIGNET ARMERINGEN	60
FIGUR 73: BØYEMOMENTET SOM OPPSTÅR I BJELKEN VISUALISERT	62
FIGUR 74: FUNKSJONENE VIEW/UPDATE SOM VISER MOMENTDIAGRAM OG TABELL OVER ARMERINGSDESIGNET	63
FIGUR 75: UTKLIPP FRA RAPPORTEN SOM VISER AT DET ER GJORT KONTROLL AV AKSIAL, BIAKSIAL- OG MOMENTKAPASITET	64
FIGUR 76: VISUALISERING AV MODELLEN VED EKSPORTERING FRA RAM-STRUCTURAL SYSTEM TIL REVIT I ITWIN ANALYTICAL SYNCHRONIZER	65
FIGUR 77: MODELLEN I REVIT FØR OG ETTER ANALYSE OG ARMERINGSDESIGN	65
FIGUR 78: OVERGANG MELLOM BJELKE- OG SØYLEARMERINGEN I REVIT	66
FIGUR 79: VISUALISERING AV KREFTENE I MODELLEN ETTER ANALYSEN	66
FIGUR 80: GENERERTE LASTKOMBINASJONER UT IFRA EN 1990:2002	67
FIGUR 81: UTKLIPP FRA BEAM DESIGN SOM VISER ARMERINGSDESIGNET FOR TOPP OG BUNN I BJELKEN	67
FIGUR 82: VIEW/UPDATE HVOR ARMERINGSDESIGN OG DESIGN WARNING MED FORKLARING TIL DENNE VAR VIST	68
FIGUR 83: UTKLIPP FRA COLUMN DESIGN REPORT SOM VISER KONTROLL AV DIMENSJONERENDE AKSIAL- OG MOMENTKAPASITET	69
FIGUR 84: SPENNINGSTØYNINGSKURVE FOR BETONG B35, SOM VIST I ANALYSERAPPORTEN FRA SOFISTIK.	71
FIGUR 85: SPENNINGSTØYNINGSDIAGRAM FOR ARMERINGSSTÅL, SOM VIST I ANALYSERAPPORTEN FRA SOFISTIK.	71
FIGUR 86: TABELL SOM INNEHOLDER INFORMASJON OM MINIMUM ARMERINGSAREAL I HENHOLD TIL EN 1992-1-1	72
FIGUR 87: UTKLIPP FRA BEAM LINE FORCE ENVELOPE SOM VISER BØYEMOMENT, SKJÆR- OG TORSJONSKREFTER FOR HVERT LASTTILFELLE I 5 ULIKE PUNKTER AV BJELKEN.	73
FIGUR 88: UTKLIPP FRA COLUMN DESIGN SOM VISER BEREGNING AV SLANKHETSKRITERIUM MED HENVISNING TIL 5.13N I EC2.	73
FIGUR 89: UTKLIPP FRA VIEW/UPDATE SOM VISER Plassering, størrelse, antall og endeavslutninger for armeringen grafisk	75
FIGUR 90: ARMERINGS RESULTAT AV EN BJELKE PÅ DEN BASIS MODULÆR ENHETEN	76
FIGUR 91: ARMERINGS RESULTAT AV EN BJELKE PÅ DEN BASIS MODULÆR ENHETEN	77
FIGUR 92: UTKLIPP FRA BJELKERAPPORTEN FOR BASIS MODULÆR ENHET SOM VISER DIMENSJONERENDE KREFTER OG KAPASITET I SNITT, SAMT NØDVENDIG OG DESIGNET ARMERING.	78

Tabelliste

TABELL 1: GEOMETRISKE DATA AV BASIS MODULÆR ENHET	41
TABELL 2: LASTENE SOM BLE LAGT PÅ BASIS MODULÆR ENHETEN	42
TABELL 3: ARMERINGS RESULTATER FRA VERKTØYET OG HÅNDBEREGNING	48

TABELL 4: GEOMETRISKE DATA FOR ELEMENTENE	61
TABELL 5: TYPE, PLASSERING OG MENGDE LAST FOR BJELKEN	61
TABELL 6: MATERIALEGENSKAPENE FOR BETONGEN OG ARMERINGSSTÅLET. I TILLEGG VISER UW OG UW FOR SELFWEIGHT HVA EGENVEKT OG ELASTISITETSMODUL BLIR BEREGNET UT IFRA	61
TABELL 7: VERTIKALKREFTER OG DE STØRSTE BØYEMOMENTENE OG SKJÆRKREFTENE SOM VIRKER PÅ MODELLEN	62
TABELL 8: OVERDEKNING, MINIMUMSDIAMETER OG MAKSIMUMDIAMETER FOR LENGDE- OG SKJÆRARMERING I BJELKEN	62
TABELL 9: ANTALL, LENGDE OG VEKT AV DEN TOTALE MENGDEN LENGDE- OG SKJÆRARMERING FOR BJELKEN	63
TABELL 10: KRITERIENE SATT FOR ARMERINGSDESIGNET I SØYLENE	64
TABELL 11: ANTALL, LENGDE OG VEKT AV DEN TOTALE MENGDEN LENGDE- OG SKJÆRARMERING FOR SØYLENE	64
TABELL 12: MATERIALEGENSKAPENE FOR BETONGEN OG ARMERINGSSTÅLET. I TILLEGG VISER UW OG UW FOR SELFWEIGHT HVA EGENVEKT OG ELASTISITETSMODUL BLIR BEREGNET UT IFRA	66
TABELL 13: STØRSTE VERTIKALKREFTER, BØYEMOMENT OG SKJÆRKREFTER SOM VIRKER PÅ ELEMENTENE I MODELLEN .	67
TABELL 14: ANTALL, LENGDE OG VEKT AV DEN TOTALE MENGDEN LENGDE- OG SKJÆRARMERING FOR BJELKENE	68
TABELL 15: ANTALL, LENGDE OG VEKT AV DEN TOTALE MENGDEN LENGDE- OG SKJÆRARMERING FOR SØYLENE	69
TABELL 16: OPPDAGEDE FEIL VEDRØRENDE AUTOMATISERINGEN AV 3D ARMERING FRA RAM-STRUCTURAL SYSTEM TIL REVIT	79
TABELL 17: OPPSUMMERING OG SAMMENLIGNING AV SOFISTIK OG RAM STRUCTURAL SYSTEM MED TANKE PÅ GENERERING AV ARMERINGEN I FORHOLD TIL NØYAKTIGHET OG BRUK AV EC2.....	86
TABELL 18: OPPSUMMERING OG SAMMENLIGNING AV INTEGRASJON MELLOM SOFISTIK OG RAM STRUCTURAL SYSTEM MED REVIT	88
TABELL 19: OPPSUMMERING OG SAMMENLIGNING AV VISUALISERINGEN MELLOM SOFISTIK OG RAM STRUCTURAL SYSTEM	93

SAMMENDRAG

Denne bacheloroppgaven ble utført ved NTNU i Ålesund i samarbeid med oppdragsgiveren Dr. Tech. Olav Olsen AS. Formålet med oppgaven var å utforske bruken av Finite Element Method (FEM)-analyseprogrammer SOFiSTiK og RAM Structural System med BIM-verktøyet Revit, spesielt med tanke på generering og automatisering av armeringsdesign i betongkonstruksjoner. Oppgaven utforsket potensialet i å bruke SOFiSTiK og RAM til å generere og automatisere armeringsdesign samt integreringen med BIM-verktøyet Revit, og hvordan disse programvarene og integrasjonen kan forbedre effektiviteten og nøyaktigheten i armeringsdesignprosessen.

Det ble gjennomført en grundig teoretisk gjennomgang av brukermanualer for SOFiSTiK og RAM Structural System, samt praktiske case-studier der programmene ble testet og evaluert for å bygge et solid teoretisk grunnlag. Analysene inkluderte generering av analytiske modeller, FEM-analyse, og design av armering basert på Eurokode-2-standarder.

Utforskningen viste at begge programvarene kan generere 3D-armering for en betongkonstruksjon basert på FEM-analysen av konstruksjonen. Likevel er det kun SOFiSTiK som kan generere for en hel konstruksjon. RAM Structural System har ikke funksjonalitet for takplater og dekker. Når det gjelder automatisering av de genererte armeringene i modellen, er det kun RAM Structural System som har mulighet til dette. Når det gjelder integrasjon med Revit, er det kun SOFiSTiK som er direkte integrert i Revit, mens RAM Structural System integreres med Revit ved bruk av tredjepartsverktøyet iTwin.

SOFiSTiK og RAM Structural System har begge styrker som gjør dem godt egnet til å effektivisere armeringsdesignprosesser og øke nøyaktigheten i konstruksjonsprosjekter. SOFiSTiK er spesielt egnet for komplekse og presisjonskrevende prosjekter med langtidsdokumentasjon på grunn av sin detaljerte analyse. Der detaljerte analyse av konstruksjoner er utført ved bruk av en annen programvare, kan RAM Structural System være nyttig og tidssparende for prosjekter hvor rask beregning av mengde armering for bjelker og søyler er nødvendig uten detaljerte analyse av konstruksjonen.

Abstract:

The purpose of the assignment was to explore the use of Finite Element Method (FEM) analysis software SOFiSTiK and RAM Structural System with the BIM tool Revit, specifically regarding the generation and automation of reinforcement design in concrete structures. The thesis investigated the potential of using SOFiSTiK and RAM to generate and automate reinforcement design, as well as the integration with the BIM tool Revit, and how these software tools and integration can enhance the efficiency and accuracy of the reinforcement design process.

A thorough review of user manuals for SOFiSTiK and RAM Structural System was conducted to establish a solid theoretical foundation. Then, the functionality of the programs was tested in practice. Furthermore, case studies were used to determine the overall potential of the software in terms of reinforcement generation and automation, as well as integration with Revit, and subsequently evaluate this potential.

The investigation revealed that both software tools can generate 3D reinforcement for a concrete structure based on the FEM analysis of the structure. However, only SOFiSTiK can generate reinforcement for an entire structure. RAM Structural System does not have functionality for slabs and decks. Regarding the automation of the generated reinforcements in the model, only RAM Structural System has this capability. In terms of integration with Revit, only SOFiSTiK is directly integrated into Revit, while RAM Structural System integrates with Revit using the third-party tool iTwin.

SOFiSTiK and RAM Structural System both have strengths that make them well-suited to streamline reinforcement design processes and increase accuracy in construction projects. SOFiSTiK is particularly suitable for complex and precision-demanding projects with long-term documentation due to its detailed analysis. Where detailed structural analysis is performed using other software, RAM Structural System can be useful and time-saving for projects where quick calculation of reinforcement quantities for beams and columns is needed without detailed structural analysis.

TERMINOLOGI

Tabell 1: Begreper i tabellen gjelder kun til håndberegninger (vedlegg A5)

Tverrsnitt	Et snitt av bjelken vinkelrett på dens lengdeakse, angitt med dimensjoner (f.eks. 400x500 mm).
Betong (B30)	Betong med en trykkfasthet klasse B30, hvor 30 angir karakteristisk trykkfasthet i MPa.
Betong (B30)	Stålstenger med strekkfasthet på 500 MPa og duktilitetsklasse C, brukt for å forsterke betong.
Nyttelast (q)	Last som påføres av brukere eller objekter, ofte variabel og midlertidig.
Egenlast (p)	Last fra konstruksjonens egen vekt, konstant over tid.
Tyngdetetthet	Massetetthet av et materiale, for betong ofte 25 kN/m ³ .
Dimensjonerende moment (M_{ed}):	Det maksimale momentet som bjelken må tåle.
Momentkapasitet (M_{rd}):	Maksimal bøyingsmoment bjelken kan tåle uten å svikte.
Strekkarmering (A_{s1}):	Maksimal bøyingsmoment bjelken kan tåle uten å svikte.
Tilleggsarmering (A_{s2}):	Ekstra armering som kreves på trykk- og strekk-siden for å motstå gjenværende ytre moment.
Skjærkraft ($V_{ed,red}$):	Den dimensjonerende skjærkraften på bjelken.
Skjærkapasitet ($V_{rd,c}$):	Kapasiteten til bjelken til å motstå skjærkrefter uten skjærarmering.
Skjærarmering (A_{sw}):	Armering som skal motstå skjærkrefter, beregnet per lengdeenhet.
Minimum skjærarmering ($A_{sw,min}$):	Minimum mengde skjærarmering som kreves i henhold til standarder som Eurokode 2,

Begreper

Spennings-tøyingskurve: Graf som viser forholdet mellom spenning og tøyning for et materiale.

Krypeffekt: Tidsavhengig deformasjon av et materiale under konstant last.

Interaksjonskurver for søyler: Diagrammer som viser kapasiteten til en søyle under kombinerte aksial- og momentbelastninger.

Metric (Metrisk system): Et desimalbasert målesystem som bruker enheter som meter for lengde, liter for volum, og gram for vekt.

English (Imperial system): Et målesystem som bruker enheter som inch, foot, og mile for lengde, og ounce og pound for vekt.

SI (International System of Units): Det internasjonale standardiserte målesystemet som er en utvidelse av det metriske systemet.

Forkortelser

ULS (Ultimate Limit State): Grensetilstand som refererer til strukturell kapasitet og sikkerhet under ekstreme belastninger.

SLS (Serviceability Limit State): Grensetilstand som refererer til funksjonelle krav som komfort og brukbarhet under normale belastninger.

1. INNLEDNING

Bygnings Informasjons Modelling (BIM) integrerer informasjon og prosesser gjennom hele livssyklusen til et bygg, fra designfasen til vedlikeholdsfasen (STATSBYGG). BIM brukes bredt av arkitekter, ingeniører og byggmestre for å fremme presisjon og effektivitet i byggeprosjekter. Som beskrivelse av Statsbygg (STATSBYGG) anvendes BIM i prosjekteringsfasen for å gi en detaljert fremstilling av byggematerialer og deres funksjoner. Dette inkluderer geometri, plassering, og relasjoner til andre BIM-objekter, samt omfattende informasjon om byggevarer. BIM-modeller støtter beslutningstakere ved å tilby visualiseringer som hjelper i valg av løsninger som oppfyller krav til tid, kostnad og kvalitet.

Til tross for de betydelige fordelene BIM tilbyr, står byggenæringen overfor utfordringer relatert til integrasjon av beregningsmodeller og tegningsmodeller (Olav Olsen). Denne bacheloroppgaven, i samarbeid med Dr. techn. Olav Olsen AS, tar sikte på å utforske potensialet som ligger i FEM-analyseprogrammene med tanke på generering og automatisering av armering for betongkonstruksjonen, og deres integrasjon med BIM-verktøyet Revit.

1.1 Problemstillingen

Problemstillingen undersøker potensialet i to FEM-programvare, SOFiSTiK og RAM Structural System, og hvordan disse kan integreres med Revit med hensyn på armeringsdesign. Videre vil oppgaven vurdere om potensialet som programvarene tilbyr, er i samsvar med Eurokode-2-reglene for dimensjonering av betongkonstruksjoner, og hvordan de kan bidra til å effektivisere armeringsdesign-prosessen og øke nøyaktigheten i konstruksjonsprosjekter. Oppgaven vil dele problemstillingen i en hovedproblemstilling og en underproblemstilling.

Hovedproblemstilling: Hvilket potensial ligger det i SOFiSTiK og RAM FEM-analyseprogrammer for integrasjon med BIM verktøyet Revit, spesielt med tanke på generering og automatisering av armeringsdesign?

Underproblemstilling: hvordan kan de potensielle som ligger i de utvalgte programvarene bidra til å effektivisere armerings designprosessen og øke nøyaktigheten i konstruksjonsprosjekter?

1.2 Avgrensning

Oppgaven fokuserer utelukkende på å utforske de to FEM-analyseprogrammene, SOFiSTiK og RAM-Structural System, og deres integrasjon med BIM-verktøyet Revit, etter oppdragsgiverens ønske. Oppgaven begrenses også til FEM-analyse og generering av nødvendig armering for betongkonstruksjoner basert på FEM-analysen.

Oppdragsgiverens første ønske var å evaluere effektiviteten av generert 3D-armering sammenlignet med konvensjonelle metoder, etter å ha utforsket de FEM-programvarene med tanke på generering av 3D-armeringsdetaljer i Revit. Vi anså imidlertid ikke tradisjonelle metoder som faste begreper, siden arbeidsmetoder endres dynamisk over tid. I tillegg hadde oppdragsgiveren ingen fast mening om hvilken tradisjonell metode som skulle brukes som sammenligningsgrunnlag. Etter flere diskusjoner med oppdragsgiveren bestemte vi oss for å utforske potensialet i SOFiSTiK og RAM, to FEM-analyseprogrammer, for integrasjon med BIM-verktøyet Revit, spesielt med tanke på generering og automatisering av armeringsdesign i betongkonstruksjoner.

I denne oppgaven utføres en gjennomgang av brukermanualer for SOFiSTiK og RAM-Structural System for å bygge et solid teoretisk grunnlag. Det blir gjennomført flere Case-studier for å observere og analysere hvordan FEM-analyse og armeringsdesign utføres av de utvalgte FEM-programvarene, hvordan programvarene genererer 3D-armering, og hvordan de integreres med Revit. I tillegg ser oppgaven på mulighetene for automatisering av den genererte 3D-armeringen i modellen. Resultatene fra disse Case-studiene analyseres for å vurdere programvarenes potensial med fokus på analysen, generering av armeringsdesign, automatisering av 3D-armering og integrasjon med Revit. Funnene diskuteres og vurderes i forhold til problemstillingen for å gi en dypere forståelse av potensialet og begrensningene.

2 TEORETISK GRUNNLAG

Dette kapittelet handler om de teoretiske grunnlagene for de forskjellige aspektene og programvarene som blir brukt i oppgaven. Gitt oppgavens omfattende dekning av konstruksjonsaspekter og bruk av flere programvarer, er det essensielt å presisere her at det som blir omhandlet i kapittelet er kun de viktigste aspektene og det teoretiske fundamentet for hver programvare som på en eller annen måte er relevant for oppgaven. Det skal bemerkes at noen av programvarene som vil bli brukt i oppgavens prosedyre, har funksjonaliteter utover det som er direkte relevant for denne oppgaven. Derfor vil kun det teoretiske grunnlaget for de programvarene som er direkte relevante for oppgaven, bli detaljert beskrevet i dette kapittelet.

Gitt oppgavetypen og dens natur, stammer mesteparten av innholdet i teoridelen fra brukermanualene utarbeidet av programvareutviklerne og eierne. Dette ble gjort ved først å gjennomgå utviklernes og eierens forklaringer om programvarene og veiledningsvideoer fra dem, samt å studere brukermanualen. Deretter blir programmenes funksjonalitet testet i praksis, som beskrevet i manualen, for å vurdere teoriens gyldighet. Basert på disse undersøkelsene anses teorien som sann eller akseptabel.

Siden all programvaren relatert til oppgaven har engelsk som bruksspråk, og funksjonalitetene inne i dem har egne benevnelser, vil vi gjennom hele oppgaven benytte de originale navnene uten å oversette dem til norsk. Likevel vil konseptene som utføres av disse funksjonene bli oversatt til norsk, ettersom norsk har egne benevnelser for dem.

2.1 Designprosess

Armert betong er et av de viktigste bygningsmaterialene som brukes i konstruksjoner (Sørensen, 2013). Derfor må være armerings prosessen svært viktig. I en bok om design av armert betong etter Eurokode 2, fremlegger Mosley et al. (Mosley, Bungey, & Hulse, 2012) at designprosessen for armert betong følger tre grunnleggende faser: konseptuell, foreløpig og detaljert. Denne oppgaven fokuserer på den tredje fasen av designprosessen, hvor man vurderer resultater fra FEM-analyseprogrammer og designaspektene ved å bruke dem, samt deres relevans. Mosley et al. (Mosley, Bungey, & Hulse, 2012) forklarer videre at det er i denne detaljerte fasen en foretrukket potensiell løsning vil bli fullstendig analysert ved hjelp av dataprogrammer der det er passende, og raffinert for å produsere detaljerte beregninger, tegninger og annen dokumentasjon som er nødvendig for kostnadsberegning og konstruksjon.

2.1 Dimensjonering av betongkonstruksjoner etter krav av eurokode 2

Dimensjonering av konstruksjoner gjennomføres ved at det påvises at konstruksjonen tilfredsstillende dimensjoneringsreglens krav i forskjellige såkalte grensetilstander (Sørensen, 2013). Gjennom oppgaven vil disse grensene brukes til å påvise hvilken av de programvarene som tar hensyn til disse grensene i analyse-prosessen og generering av 3D-armering, og i hvilken grad av nøyaktighet.

2.2 FEM (Finitte elementmetoden)

Elementmetoden (Finitte elementmetoden) er en metode der kompliserte systemer deles inn i enkle elementer (deler) med kjente og forståtte egenskaper (Bell & Meyer, 2022). Elementmetoden (FEM) kan forstås fra to perspektiver: det fysiske eller ingeniørperspektivet og det matematiske perspektivet. FEM er en teknikk for å analysere komplekse systemer i ingeniørfag og matematikk. Ingeniørtilnærmingen fokuserer på å modellere og forstå hvordan systemet fungerer i den virkelige verden (Bell K. , 2013). Dette tillater ingeniører å benytte ut komplekse fysiske strukturer med enklere beregningsmodeller som beholder de viktigste egenskapene til det originale systemet, noe som gjør problemet lettere å analysere og løse. Gjennom oppgaven vil FEM beskrives i sammenheng med hvordan en ingeniør brukes til FEM, generering av FEM-analyse ved bruk av SOFiSTiK og RAM Structural System, og hvordan koblingen med Revit er under design av armerings prosessen.

2.3 Analytisk modell

En analytisk modell er en representasjon av den strukturelle fysiske modellen bestående av analytiske elementer, geometri, grensebetingelser, material egenskaper, og laster. Analytiske modeller brukes til å eksportere konstruksjonens helhetlige modell til FEM-programvarene for å generere finitte elementer mesh i denne oppgaven (Autodesk, 2024).

2.4 Programvare

I dette delkapittelet vil det forklares detaljert om programvarene som skal utforskes i oppgaven og deres virkemåte. Teoridelen om programvarene vil bli beskrevet så detaljert som mulig, fordi dette er avgjørende for det endelige hovedmålet med oppgaven. Målet er å undersøke potensialet som ligger i SOFiSTiK og RAM Structural System, to FEM-analyseprogrammer, og deres integrasjon med BIM-verktøyet Revit. Dette gjelder spesielt for generering og automatisering av armeringsdesign. Det er viktig å skrive detaljert for å utforske både hva og hvordan resultatene eller produktene påvirkes, for eksempel hvordan en av programmene beregner nødvendig armering i en bjelke. Det skal undersøkes hva som påvirker det endelige resultatet.

2.4.1 Revit

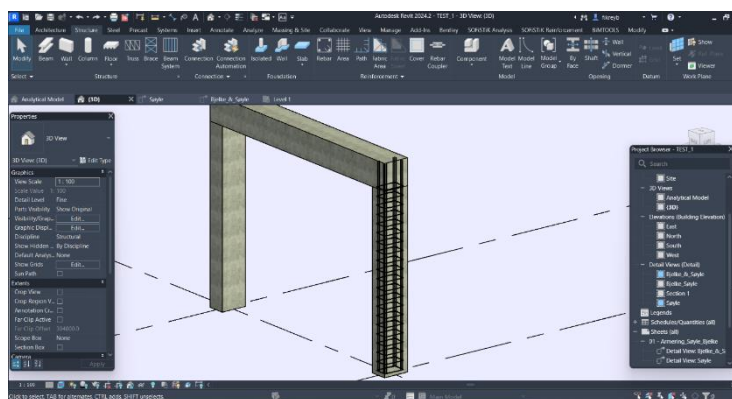
Ifølge Autodesk (Autodesk, 2024), utvikleren og produsenten av Revit, er Revit et verktøy for bygningsinformasjonsmodellering (BIM) som utfører tredimensjonal modellering med høy presisjon. Revit bruker tre typer data: de som er relatert til bygninger og deres arkitektoniske komponenter, de som omhandler bygningsstrukturene, og andre som er knyttet til de mekaniske, elektriske og sanitære (MES) systemene. I tillegg er Revit utviklet slik at samhandling mellom de ulike ingeniørdisiplinene i et byggeprosjekt forenkles. Ved å tilby en felles modell som alle parter arbeider på, sikres det at informasjon deles og koordineres effektivt, sier Autodesk (Autodesk, 2024). I dette oppgave er Revit det sentrale verktøy. Oppgaven vil grundig utforske integrasjon av de to FEM-analyse-programvarene med Revit, og Revits mulighet og betydning i designprosessen av 3D-armering.

Revit verktøyer og funksjoner som blir brukt i denne oppgaven:

Som beskrivelse av Autodesk (Autodesk, 2024) utgjør Revit et grunnleggende verktøy der programvaren fungerer som en kritisk løsning innen rammen av strukturdesign og dimensjonering. Det tilbyr verktøy og funksjoner som støtter detaljert modellering av strukturelle elementer. Derfor er det essensiell å gjennomgå de verktøyene i Revit som blir brukt i designprosessen av 3D-armering.

2.4.2 Revit structure

I oppgavens sammenheng designprosessen for en strukturellkonstruksjon starter i Revit Structure. Revit Structure er en av verktøyene i Revit som brukes til å modellere og designe konstruksjonen. Noen av de viktigste funksjonene i Revit Structure er «evnen til å lage 3D-



Figur 1: modellering av betongkonstruksjon og designing av armering i Revit Structure

armeringsdesign for både støping på stedet og prefabrikkerte betongstrukturer, samt produksjon av verkstedstegninger og armeringsplaner for armeringsjernet (Autodesk, 2024)». I denne oppgaven brukes Revit Structure for å lage modeller for FEM-analyse og armeringsdesign ved hjelp av SOFiSTiK og RAM Structural System. Siden oppgavens hovedmål er FEM-analyse og armeringsdesign, tas det ikke hensyn til å beskrive hvordan Revit Structure fungerer i detalj eller modellering av en struktur i Revit.

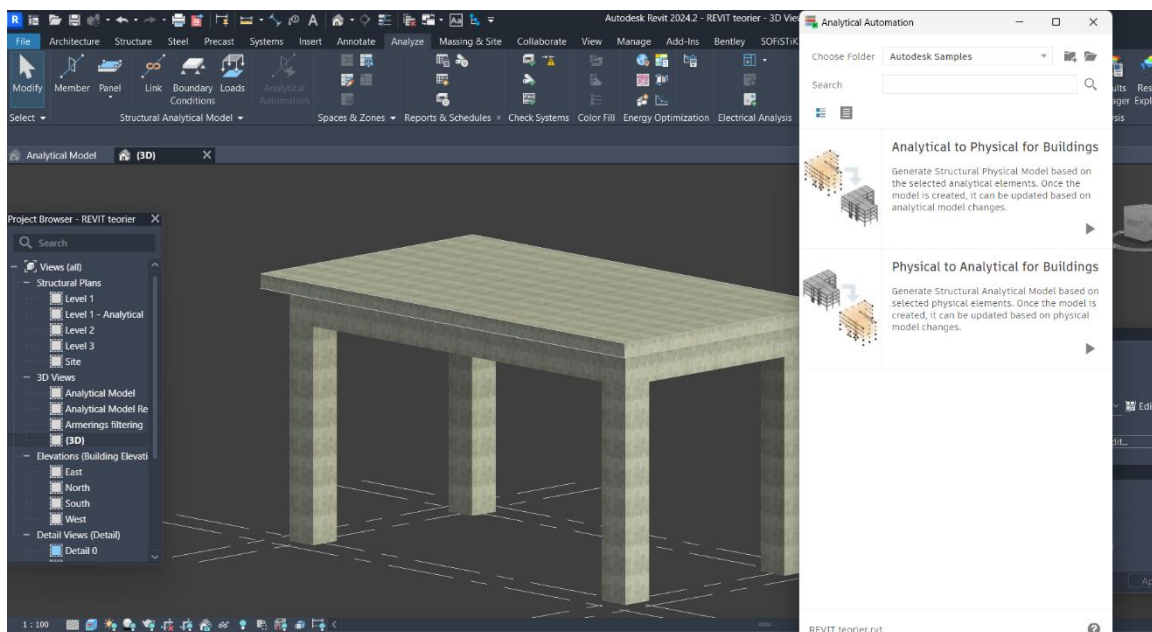
2.4.3 Revit Analyze

Teorien nedenfor er kun det som blir gjort i oppgaven.

For å integrere FEM-analyseprogrammer med Revit for armeringsdesign, starter man med en strukturell modell i Revit. Denne modellen tjener som grunnlag for FEM-analyser. Revit Analyze sin rolle i designprosessen omfatter å utvikle en analytisk modell, fastsette grensebetingelser og definere samt implementere forskjellige laster basert på den strukturelle modellen.

Utvikling av en analytisk modell i Revit kan gjøres på tre måter:

1. Manuell metode: Opprette linjer innenfor den fysiske modellen og koble dem sammen slik at modellen blir korrekt representert. Selv om Revit tilbyr funksjoner som støtter denne prosessen, kan den være tidkrevende og mindre nøyaktig for komplekse konstruksjoner.
2. Dynamo-plug in: Bruk av Revit i kombinasjon med Dynamo-plug in for å automatisere noen av prosessene.
3. SOFiSTiK-analyse: Integrering av Revit med SOFiSTiK for spesialiserte analyser.



Figur 2: Automatisering av analytisk modell i Revit ved bruk av dynamo

Analytiske modeller som opprettes manuelt i Revit, eller med Dynamo-plug in, har samme egenskaper og kan brukes for eksportering av modellen til andre FEM-programvarer. Modeller utviklet med Revit og SOFiSTiK er primært beregnet for integrert bruk mellom disse to programmene. Oppgaven tar ikke sikte på å beskrive den detaljerte bruken av Revit Analyze i dybden. Dette skyldes primært at hovedmålet med oppgaven er å fokusere på andre aspekter ved konstruksjonsdesign og FEM-analyse, hvor Revit Analyze spiller en mer støttende rolle. Detaljerte beskrivelser av Revit Analyze utelates derfor for å holde fokus på oppgavens kjerneelementer.

2.5 SOFiSTiK

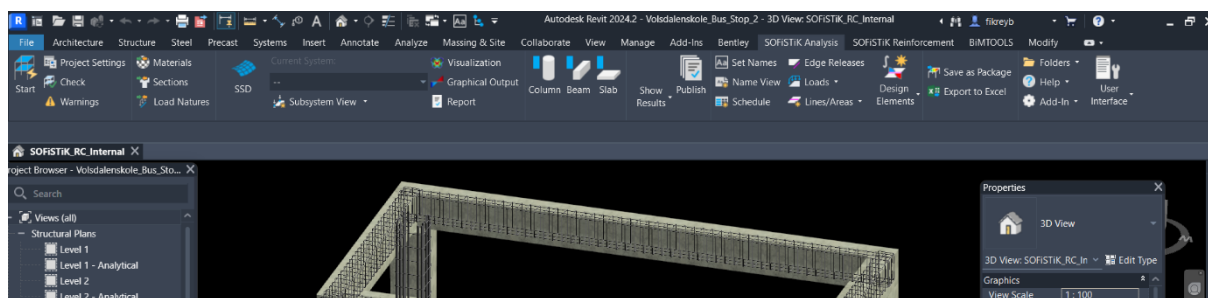
SOFiSTiK er en tyskbasert programvarepakke for strukturanalyse, design og bygningssimulering. Ifølge beskrivelsen fra eierne (SOFiSTiK, 2024) brukes den hovedsakelig innen bygg- og anleggsbransjen for å utføre komplekse beregninger og analyser av konstruksjoner som bygninger, broer og annen infrastruktur. SOFiSTiK Analysis + Design for Revit er en del av programvarepakken og er en integrert BIM-løsning for strukturell analyse av bygninger. Programvaren er integrert i Revit, og dette er en av hovedprogrammene som skal utforskes i oppgaven.

2.5.1 SOFiSTiK Analysis + Design

Ifølge utviklerens og eierens bruke manual er:

SOFiSTiK Analyse + Design et verktøysett som utfører strukturanalyser og elementdimensjonering for byggverk ved bruk av Autodesk® Revit®. Det gjør det mulig å generere en 3D-endelig elementmodell fra Revits analytiske modell, inkludert laster og grenseforhold. Genereringen av den endelige elementmodellen initieres direkte fra Revit. Ytterligere kommandoer tillater verifisering og forbedring av Revits analytiske modell med tanke på analyse av endelige elementer (SOFiSTiK, 2024).

SOFiSTiK Analyse + Design (Figur 3) er integrert i selve Revit programvaren. Denne funksjonaliteten er sentral for denne oppgaven som tar for seg generering av 3D-armering basert på FEM-analyse, og effektivisering av armerings-prosessen i konstruksjoner ved hjelp av digitale verktøy.



Figur 3: SOFiSTiK verktøyet i Revit

I manualen står det også at «SOFiSTiK Analyse + Design gir tilgang til `ssd_small` SOFiSTiK Structural Desktop (SSD), der hele spekteret av SOFiSTiK-funksjonaliteter er tilgjengelig: ytterligere analyser, innhylling samt design i henhold til ulike standarder og koder» (SOFiSTiK, 2024). Allikevel vil den prosedyren ikke utforskes i oppgaven. Gjennom hele oppgaven kommer det til å bruke kun SOFiSTiK i stedet for SOFiSTiK Analyse + Design for Revit.

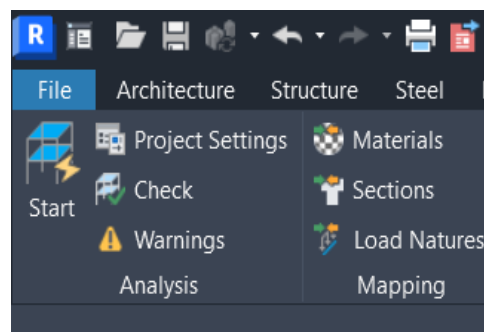
2.5.2 SOFiSTiK verktøyene som blir bruk i oppgaven:

SOFiSTiK Analysis + Design verktøyet har flere sett av verktøyer som har viktig funksjonalitet med å analysere, og generere og designe den eventuelle konstruksjonens armering basert på den FEM-analyse resultatene. Alle må innstilles riktig og prosedyren må utføres i riktig rekkefølge slik at resultatet blir tilfredsstillende. I oppgaven er verktøyene Analyse, Mapping, Systems, Design og Results som blir brukt mye. Det er viktig å bemerke her at mesteparten av beskrivelsene for de verktøyene stammer fra tutorial videoer som utarbeidet av SOFiSTiK.

Derfor er det vanskelig å sitere nøyaktig det som ble sagt i videoer her. Det er forventet da at de som leser forstår hvordan teorigrunnet er bygget.

2.5.3 Analysis:

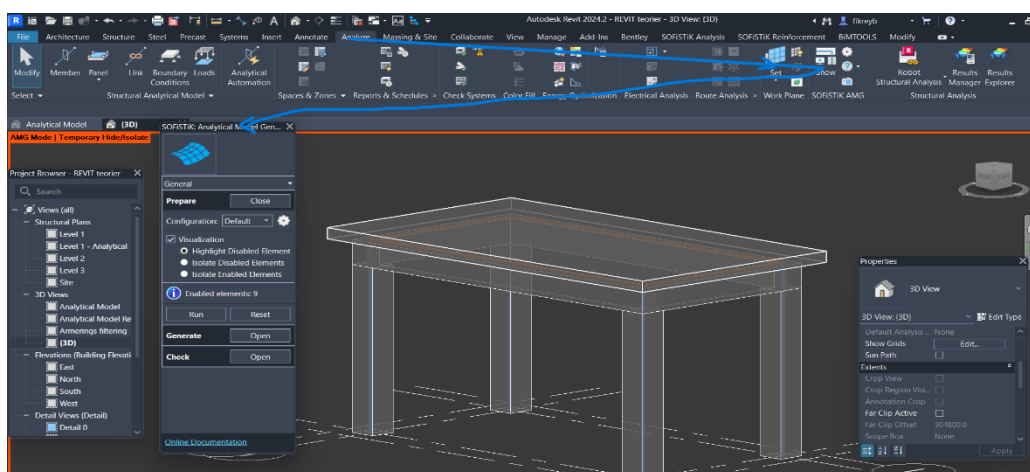
Analysis (Figur 4) delen av verktøyet er det viktigste grunnlaget for videre prosesser. Der definerer man flere faktorer som avgjøres analysens resultat til å være brukbar på en forsvarlig måte. I denne delen bestemmer man hvilke designkoder som skal tas for analysegrunnlag, type tverrsnitt av konstruksjonen, prosjektets parametere, lasttilfeller og type laster, og forventingsresultater (SOFiSTiK, 2024).



Figur 4: SOFiSTiK ulike innstillingsfaner i Revit

2.5.4 SOFiSTiK Analytical Model Generator

SOFiSTiK Analytical Model Generator muliggjør generering av analytiske modeller i Autodesk® Revit® 2024, for å skape en funksjonell 3D-endeelig elementmodell til bruk i strukturanalyse (SOFiSTiK, 2024). I bruker manualens hjemmeside finner man en rekke beskrivelse av verktøyets virkemåte. Verktøyet er innebygd i Revit og fungerer basert på de forhåndsdefinerte innstillingene og definisjonene som ble gjort i prosjektinnstillingene for analyse-delen. Verktøyet fungerer ved å koble (Figur 5) med Revit sitt analyseverktøy, som ble beskrevet i kap. 2.4.3.

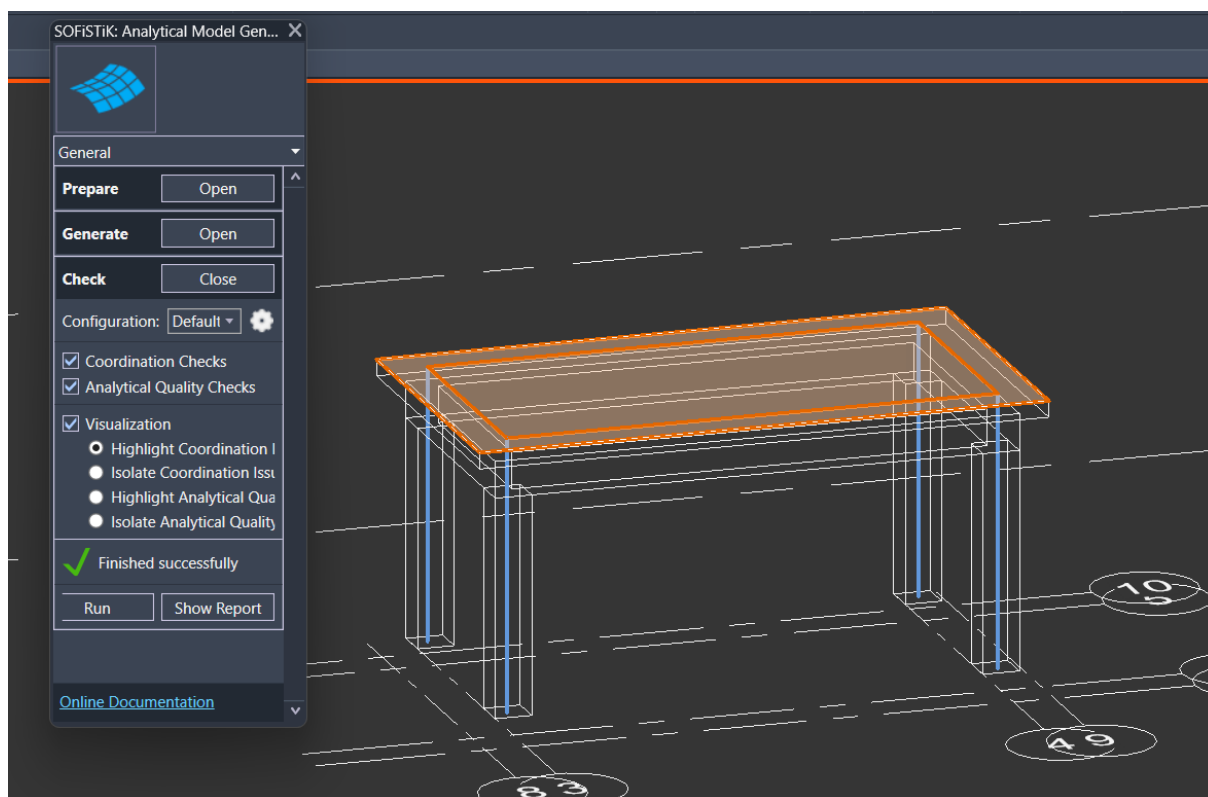


Figur 5: Forberedelse og lagging av Analytisk modell ved bruk av Revit Analyze og SOFiSTiK Analytical Model Generator.

Fullstendig forklaring av generatoren får man i hjemmeside til generatoren eller får man ved å se tutorial videoer av den. Her beskrives det hva som ble brukt i sammenheng dette oppgave. Som beskrivelse av tutorial videoen (SOFiSTiK, 2023) har generatoren tre faser. Først

forbereder den 3D-Revit-modellen for generering. I denne delen bestemmes det hvilke deler av konstruksjonen som kan, eller ikke kan, genereres til en analytisk modell (Figur 6).

Funksjonaliteten har evnen til å skille mellom strukturelle elementer og arkitektoniske eller

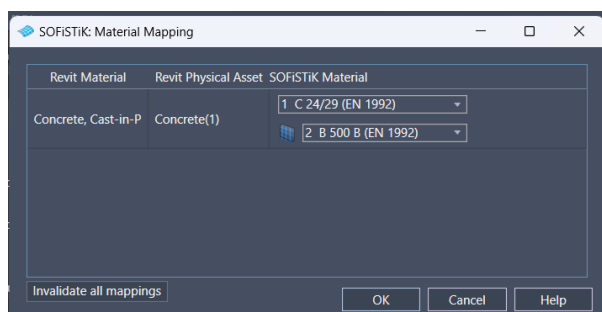


Figur 6: Laging av analytisk modell i Revit ved bruk av SOFiSTiK analytisk modell generator

andre elementer som ikke er relevante for FEM-analyse. Deretter generere modellen for å utvikle den analytiske modell. Til slutt sjekker til den analytiske modellen om det er noe feil i det som har skjedd på grunn av inkonsistent i den fysiske modellen. Der får man mulighet å sjekke den fysiske modellen for noen endring eller fjerning.

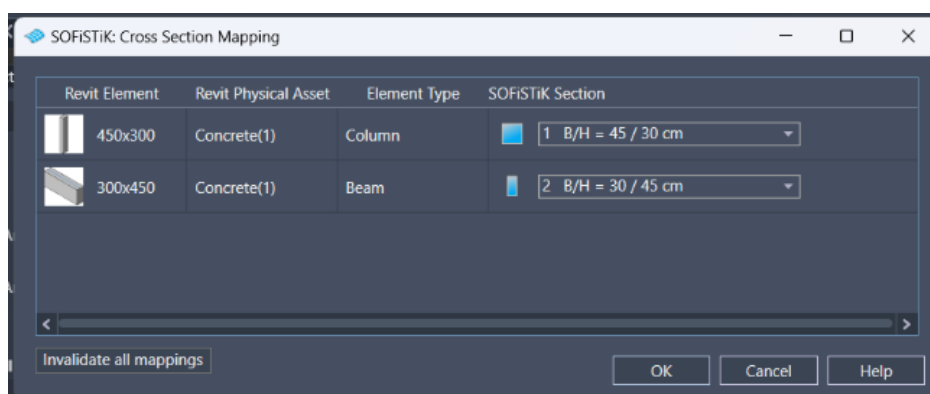
2.5.5 SOFiSTiK Analysis

SOFiSTiK Analysis genererer og analyserer FEM fra den analytiske modellen i den aktive Revit-visningen (SOFiSTiK, 2023). For at generering og analyse skal utføres på forsvarlig vis, starter man med å fastsette grensebetingelser. Deretter defineres og utarbeides de forskjellige lastene for konstruksjonen på den analytiske modellen.

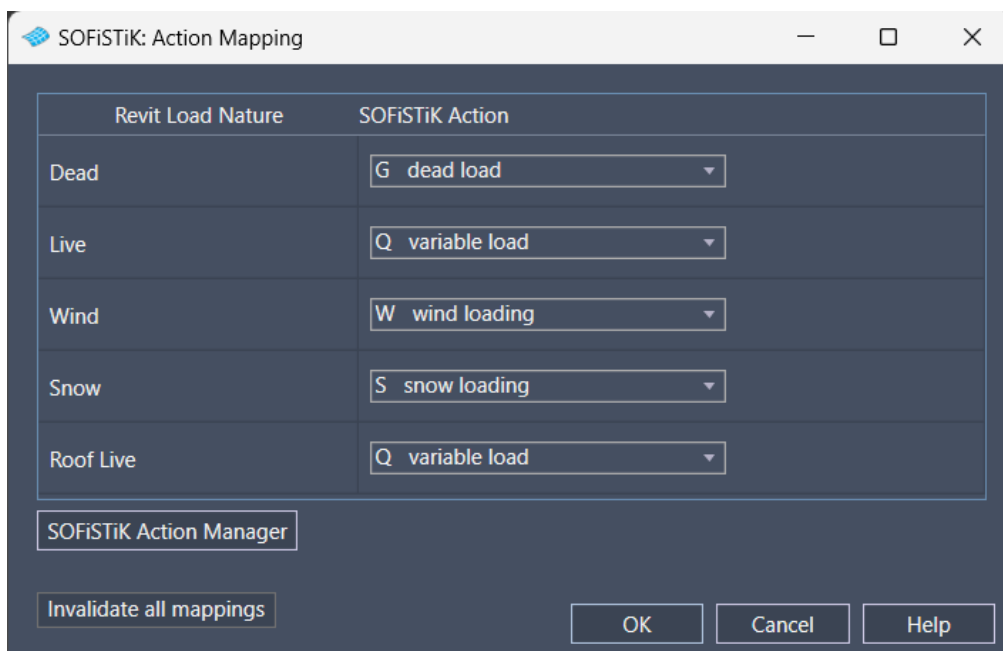


Figur 7: Sjekking og valg av material for modellen ved bruk av SOFiSTiK material Mapping i Revit

En del av prosessen er å sørge for at materialtypene (Figur 7), lasttilfeller (Figur 9), og konstruksjonens tverrsnitt (Figur 8) er konsistente i Revit- og SOFiSTiK-tolkningen.



Figur 8: Sjekking og valg av tverrsnitt for modellen ved bruk av SOFiSTiK Cross Section Mapping i Revit

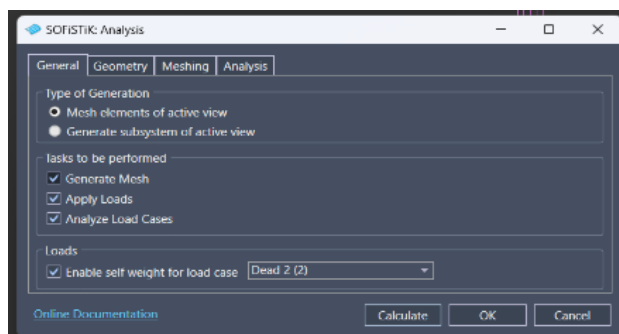


Figur 9: Bestemmelse av lastene som skal bli med i analyse går i Action Mapping

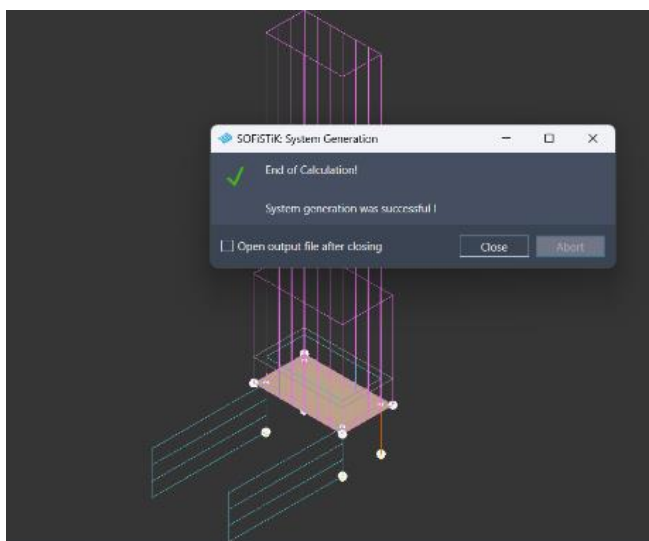
I bruker manualen (SOFiSTiK, 2023) er det anbefalt at før man kjører genereringen og analysen, må man også sjekke alle de nødvendige elementene for analysen er synlige i Revit. Verktøyet følger prinsippet «What you see is what you get», som betyr at kun de elementene som er synlige og dermed ansett som relevante av brukeren, inkluderes i FEM.

Analyse verktøyet har mulighet for «Subsystemer» i tilfeller hvor den aktive Revit-visningen er en SOFiSTiK Subsystem View, men dette er ikke relevant i denne oppgaven.

Når man starter analysen, dukker det opp en dialogboks (Figur 10) med fire faner som tillater konfigurering av analysen. Her kontrollerer og bestemmer man innstillingene som skal brukes under analysen og forventningene til resultatene. Etter konfigureringen kan man enten lagre innstillingene eller direkte starte beregningen ved å velge «Calculate». Dette initierer den faktiske analysen av den endelige elementmodellen basert på de definerte parameterne (Figur 11). Det er to mulige utfall som kommer etter analysen. Enten så er analysen utført på en forsvarlig måte, og er klar til videre bruk, eller analysen er utført med noen unntak som antyder at det er noe som må sjekkes og fikses med modellen. Man får vite hva som er feilen med modellen ved å gjennomgå den analysen rapporten



Figur 10: Analyse konfigurering av SOFiSTiK som dukker opp når man starter analyse



Figur 11: Fanen som dukker opp etter analysen viser enten analysen var suksessfull eller det er noe advarsel

I SOFiSTiK sin brukermanual (SOFiSTiK, 2024) er det et viktig tips om å generere forskjellige typer, spesielt Subsystem Views. Manualen forklarer at dette kan være nyttig for å simulere ulike lasttilfeller eller til og med forskjellige strukturelle modeller. Dette gir dypere forståelse av konstruksjonens oppførsel under varierte forhold. Siste nevnte avsnittet er ikke med i oppgaven, men er viktig for å effektivisere designprosesser og øke nøyaktigheten i komplekse konstruksjonsprosjekter.

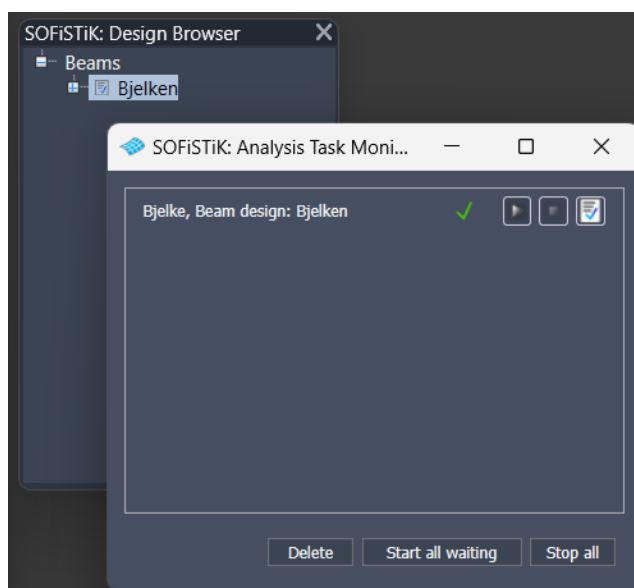
2.5.6 SOFiSTiK Design

SOFiSTiK Design (Figur 12) er et verktøy som er integrert i Revit og som muliggjør å designe konstruksjonselementene, søyle, bjelke, plate og vegger (SOFiSTiK, 2024). Verktøyet bruker dataene av FEM-analysen til å foreslå mengde, type og måte for plassering av armeringsjernene.

Man bruker verktøysettet til hvert sitt mål. I denne oppgaven undersøkes funksjonaliteten av designverktøyet på en samlet struktur av enkelt betongkonstruksjon som inneholder fire søyler med fire bjelker, og en takplate, i tillegg til en betongbjelke for

seg selv. Det er viktig å gjennomføre denne typen sjekker for å utforske mulighetene programvaren tilbyr, siden dette krever et høyere kompetansenivå enn det vi for øyeblikket har for sjekking av håndberegning av en samlet kompleks konstruksjon, og samt til å forstå resultater av en kompleks konstruksjon.

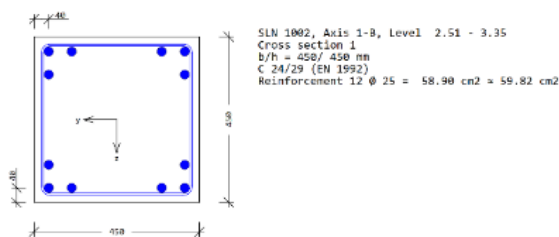
Under SOFiSTiK Design er det to hjelpepaneler (Figur 13) som tas i bruk med design verktøyet. Den ene er Design Browser, og den andre er Analysis Task Monitor. Design Browser viser og lar man håndtere de eksisterende designgruppene. Den gir også direkte tilgang til beregningsrapportene for hver designgruppe og muliggjør fremheving av alle elementer i modellen som tilhører en spesifikk designgruppe. I Analysis Task Monitor sitt vindu kan beregninger for SOFiSTiK Design håndteres. Analysis Task Monitor viser også statusen for hver designberegning og gir direkte tilgang til beregningsrapportene og ved behov, til feilrapportene.



Figur 13: SOFiSTiK Design to hjelpe-paneler

Fra tutorial videoer (SOFiSTiK, 2024) får man vite at etter gjennomføringen av FEM-analyseprosessen, kan man følge designprosessen direkte uten videre endring, ellers man må man gruppere de samme type elementene på en logisk måte. Resultatene fra FEM-analysen er lagret på bakgrunn av programvaren, og design av elementene baserer seg på denne dataen.

Den praktiske bruken av designgjennomføringen på de ulike delene av konstruksjonen, søyle, bjelke og takplate vil bli tas i metode kapittelet under framgangsmåten. Allikevel er det viktig å nevne her at programvaren gir designresultatene (Figur 14) av søyle i tallverdi i tillegg med plasseringen av armeringsstengene i tegningsform, mens resultatene av bjelker og plater kommer i tabellform med tall verdi og ordforklaring.



Summary of the Required Reinforcement - Design Case No. 1

Axis	Spn./Sup.	x [m]	Basic			Required		
			As, z+ [cm2]	As, z- [cm2]	as, w [cm2/m]	As, z+ [cm2]	As, z- [cm2]	as, w [cm2/m]
		3.029	9.42	2.37	9.80	20.27	8.64	2.94
		3.178	9.42	2.37	9.80	20.18	8.55	2.94
		3.328	9.42	2.37	9.80	19.87	8.26	2.94
		3.477	9.42	2.37	9.80	19.42	7.79	2.94
		3.627	9.42	2.37	9.80	18.78	7.14	2.94
		3.777	9.42	2.37	9.80	17.96	6.29	2.94
		3.926	9.42	2.37	9.80	16.48	4.82	3.43
		4.076	9.42	2.37	9.80	15.25	3.55	4.00
		4.225	9.42	2.37	9.80	13.68	2.37	4.57
		4.375	9.42	2.37	9.80	11.33	2.37	5.10
		4.525	9.42	2.37	9.80	9.42	2.37	5.69
		4.674	9.42	2.37	9.80	9.42	2.37	6.21
		4.824	9.42	2.37	9.80	9.42	2.37	6.76
		4.973	9.42	2.37	9.80	9.42	2.37	7.49

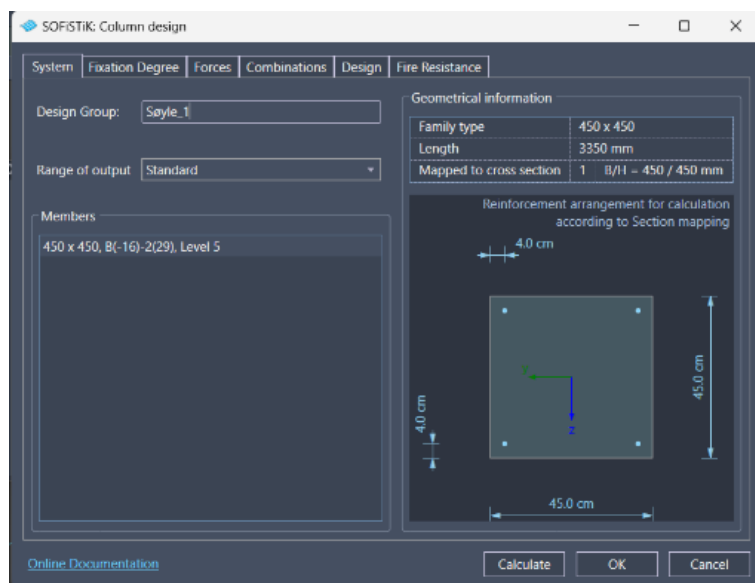
Figur 14: Eksempelvis av hvordan resultatene ser ut

2.5.6.1 Column Design

Column Design er en del av Design verktøysettet som gir mulighet til å utføre en sjekk eller å utforme nødvendig armering for et valgt analytisk element som representerer en betongsøyle. Det er kun vertikale elementer støttes av denne kommandoen. Brukermanualen (SOFiSTiK, 2024) beskriver detaljert hvordan som fungerer verktøyet:

1. Klikk på SOFiSTiK Analyse-fanen > Design > Søyledesign.
2. Velg ett eller flere analytiske elementer med den strukturelle rollen Søyle for designet.
3. I designvinduet som åpnes, skriv inn et navn for Designgruppen.
4. Kontroller og juster innstillingene.
5. Klikk OK for å lukke og lagre innstillingene, eller klikk Beregn for å utføre designberegningen.

Ved å velge søylene som skal designes og klikke videre på søyleikonet av designverktøyet dukker dette vinduet opp.



Figur 15: Designkonfigurasjonsdialogen som dukker opp etter valg av Column ikon fra design verktøyet

Designkonfigurasjonsdialogen (Figur 15) som vises på bildet beskrives i brukermanualen (SOFiSTiK, 2024) slik:

- *Fane System:* Gir generell informasjon om de valgte søylene og tverrsnitts geometrien.
- *Fane Fixation Degree:* Lar deg justere grensebetingelsene som brukes i designberegningen.
- *Fane Forces:* Gir en oppsummeringstabell over interne krefter for alle beregnede lasttilfeller.
- *Fane Combinations:* Presenterer en oppsummeringstabell over lastkombinasjonene som er vurdert for designet. Her kan brukerdefinerte kombinasjoner legges til de automatisk genererte kombinasjonene.
- *Fane Design:* Lar deg justere designparametere og gir en dynamisk forhåndsvisning av resultatene.
- *Fane Fire Resistance:* Muliggjør vurdering av brannmotstanden til søylene i gruppen.

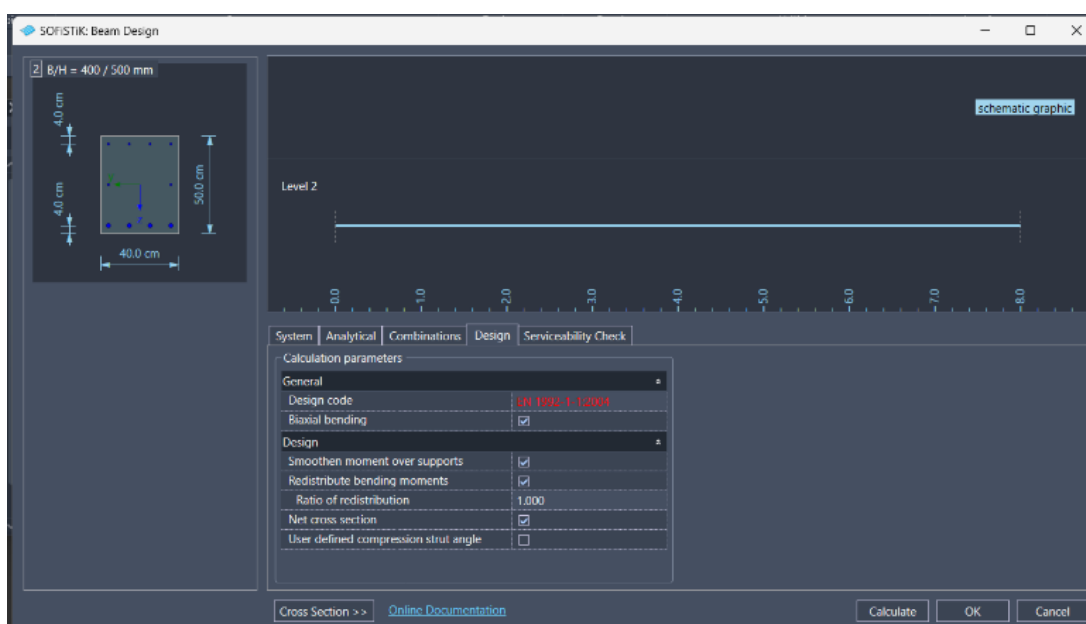
I denne oppgave tas ikke fanen Fire Resistance med.

2.5.6.2 Beam Design

Beam Design brukes for utforming av nødvendig armering for bjelkedelen av betongkonstruksjonen. Brukermanualen (SOFiSTiK, 2024) viser hvordan verktøyet virker i praksis på den følgende måte:

1. *Klikk på SOFiSTiK Analyse-fanen > Design > Bjelkedesign.*

2. Velg ett eller flere analytiske elementer med den strukturelle rollen Bjelke for utformingen.
Hvis det er flere, må elementene være på rekke.
3. I designvinduet som åpnes, legg inn et navn for Designgruppen.
4. Kontroller og juster innstillingene.
5. Klikk OK for å lukke og lagre innstillingene, eller klikk Beregn for å utføre designberegningen.



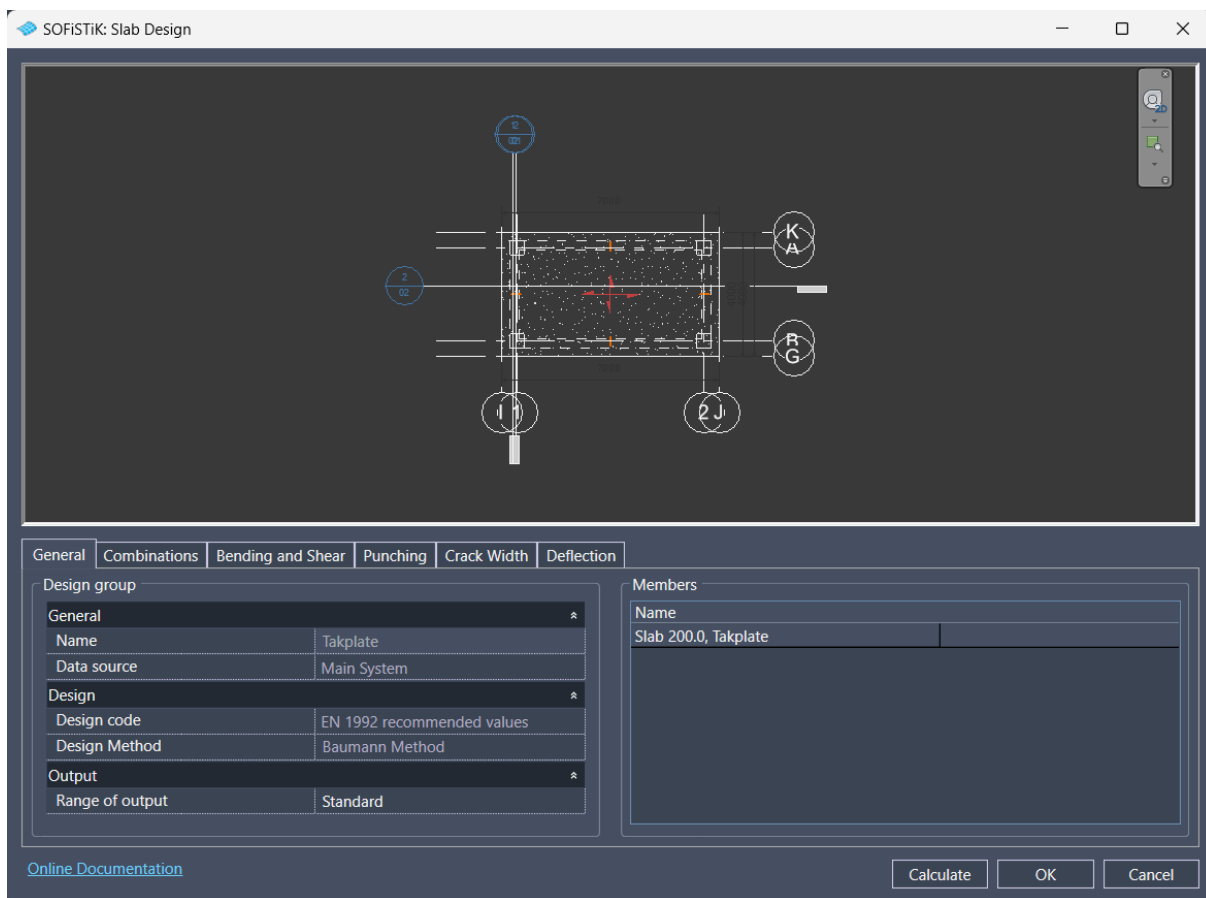
Figur 16: Designkonfigurasjonsdialogen som dukker opp etter valg av Beam ikon fra design verktøyet

Designkonfigurasjonsdialogen (Figur 16) som er vist ovenfor, inneholder fire faner som forklares i brukemanualen (SOFiSTiK, 2024) på den følgende måte:

- *Fanesystem:* Gir generell informasjon om de valgte bjelkene og tverrsnittene, som kan utvides fra venstre side.
- *Fane Analytical:* Muliggjør justering av grensebetingelsene og oppsett av kutt som vil bli brukt i designet.
- *Fane Combinations:* Gir en oppsummeringstabell over lastkombinasjonene som er vurdert for designet.
- *Fane Design:* Lar man justere designparametrene.
- *Fane Serviceability Check:* Tillater kontroll av sprekker og deformasjoner gjennom beregninger.

2.5.6.3 Slab Design

Slab Design-verktøyet brukes for å designe armering på betong takplater eller betong gulvplater. Verktøyet virker på tilsvarende måte som de to verktøyene beskrevet over.



Figur 17: designkonfigurasjon som brukes for å bestemme virkingen av designresultater på takplate

Designkonfigurasjonen (Figur 17) vises når man klikker på 'Slab' i SOFiSTiKs designverktøy. Denne konfigurasjonen er avgjørende for å påvirke både designprosessen og resultatene, og består av seks faner. Hver fane inneholder ulike innstillinger som bidrar til konfigurasjonen. Brukermanualen (SOFiSTiK, 2024) tilbyr detaljert informasjon om de forskjellige funksjonene til de seks fanene og deres bruk i praksis.

Gitt omfanget av detaljene i manualen, og ettersom vår kompetanse ikke strekker seg til spesifikk kunnskap om beregning av armering for betongplater, kan det være utfordringer med å finne nøyaktig norsk terminologi for å oversette eller parafrasere alle deler av manualens innhold korrekt. Derfor vil denne seksjonen ikke inneholde en oversettelse eller parafrasering av innholdet i manualen. Det vil derfor kun refereres direkte til brukermanualen (SOFiSTiK, 2024) for dypere forståelse. Likevel vil armeringsdesign for takplaten utføres og vurderes i henhold til manualen, men i mindre grad i denne oppgaven. Det er viktig for oppgaven å gjøre det på denne måten for å se hvor fullstendig SOFiSTiK-verktøyet er for en hel konstruksjon.

Med 'hel konstruksjon' menes en bygning som består av betongsøyler, bjelker samt tak- og gulvplater. Det er også viktig å nevne at 'Slab Design'-verktøyet er det mest avanserte sammenlignet med de to andre designverktøyene fra SOFiSTiK.

2.6 Bentley Systems

Bentley Systems, Incorporated er et amerikansk programvareutviklingselskap som utvikler omfattende løsninger innen arkitektur og ingeniørvitenskap til arkitekter, ingeniører, byggmestere og driftsoperatører for å fremme utviklingen av infrastruktur. Bentley Systems tilbyr et bredt spekter av RAM-programmer, hver med sin egen spesialisering innen forskjellige aspekter av strukturell design og analyse. Disse programmene er integrerte løsninger som bidrar til mer effektiv håndtering av spesifikke ingeniøroppgaver (Bentley, 2024).

2.6.1 Hovedprogrammer for analyse og design RAM-familie

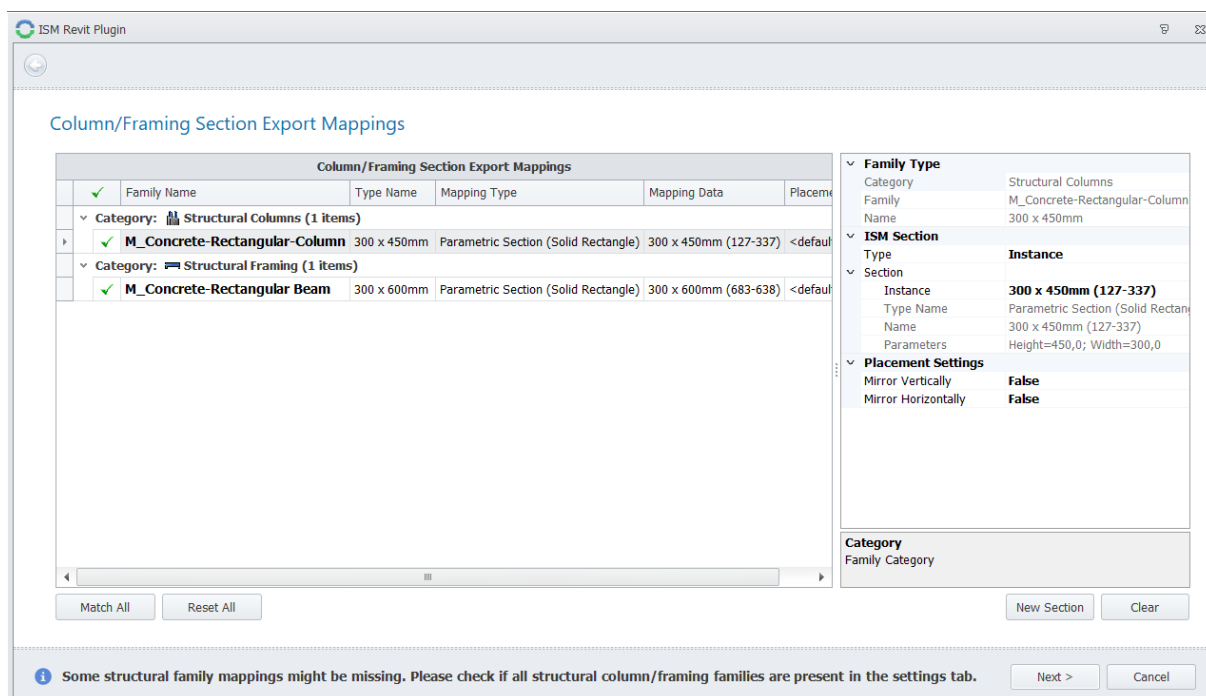
Det er tre hovedprogrammene i RAM-serien som oftest brukes til å analysere og designe konstruksjoner er; RAM Elements, RAM Concept og RAM Structural system. RAM Elements tilbyr detaljert FEM-analyse og design av strukturelle komponenter som bjelker og søyler, samt fundamenter (Bentley, 2024). RAM Concept er spesialisert for FEM-analyse og design av betongplater, matter og fundamenter (Bentley, 2024). RAM Structural System er utviklet for omfattende prosjektering av byggkonstruksjoner, og kan blant annet utføre FEM-analyse og designe søyler og bjelker i stål og betong (Bentley, 2024).

I denne oppgaven er det RAM Structural System som blir utforsket for bruk av FEM-analyse samt armeringsdesign for betong konstruksjoner. De to andre har ikke ble valgt fordi de oppfyller ikke oppgavens endelige mål, som er generering av 3D-armering og mulighet til å automatisere armeringen i modellen. RAM-Structural System ble valgt på grunn av dens mulighet for analyse- og 3D-armeringsdesign samt dets evne til å integrere med Autodesk Revit for automatisert generering av 3D-armering i modellen.

2.6.2 iTwin Analytical Synchronizer

iTwin Analytical Synchronizer fra Bentley Systems er et verktøy som muliggjør synkronisering og håndtering av data mellom forskjellige programvarer innen bygg- og konstruksjonsdesign. Verktøyet er en del av Bentleys ISM-teknologi som administrerer og deler prosjektinformasjon gjennom ulike faser som modellering, analyse, design og detaljering av strukturelle prosjekter (Bentley, 2024).

I Revit finnes iTwin som en Plug In, som brukes til å importere og eksportere modeller til 3rd-parts programmer. For å eksportere en modell fra Revit, som denne oppgaven bruker, velger man Bentley i verktøylinjen, og deretter Push to File. Dette åpner en dialogboks kalt ISM Revit Plug In (Figur 18), hvor elementene i modellen må tilordnes til et ISM-bibliotek kalt ISM Repository. Under eksporteringen inneholder modellen informasjon om materialene og tverrsnitts dimensjonene som skal tilordnes i ISM. Brukeren har to alternativer for tilordning: Match All, hvor ISM søker gjennom sitt bibliotek for å finne et tilsvarende materiale, eller Create New, hvor brukeren manuelt oppretter et nytt. Dette gjelder også for tildeling av tverrsnitts dimensjoner. Prosessen resulterer i en ISM-fil av modellen, som deretter kan brukes i RAM Structural System (Bentley Structural, 2023).



Figur 18: Ved eksportering av modell fra Revit opprettes et ISM Repository ved å tilegne materialer og tverrsnitt til iTwin sitt bibliotek

2.6.3 RAM Structural System

RAM-Structural System er en programvare utviklet av Bentley systems som brukes for analyse og design av stål- og betong konstruksjoner. Ifølge produsenten tilbyr RAM-Structural System et utvalg av verktøy for å designe betong- og stålkonstruksjoner, og det kan blant annet brukes til å lage 3D-modeller av bygningsstrukturer og lage armeringsdesign, samt påføre belastninger på modeller og deretter utføre FEM-analyser av disse (Bentley, 2024). Programvaren sjekker modellen mot spesifiserte byggekoder og kommer blant annet med forslag til armeringsdesign og plassering av disse ut ifra analysene som er gjort. RAM Structural System kommer med 7

moduler, som er RAM Manager, RAM Modeler, RAM Steel Beam, RAM Steel Column, RAM Frame, RAM Concrete og RAM Foundation (Bentley, 2024). I denne oppgaven er det RAM Manager, RAM Modeler og RAM Concrete som er relevant da vi ser utelukkende på betongkonstruksjoner.

2.6.4 RAM Manager

RAM Manager er portalen til programvaren RAM-Structural System og man bruker denne for å få tilgang til RAM-Structural System sine funksjoner og for å spesifisere kriterier. (Bentley, 2024).

Fra File-menyen kan man åpne eller opprette en ny fil, og dette er det første man må gjøre for å videre få tilgang til alle funksjoner. Videre gir RAM Manager mulighet til å sette kriterier for analysen via Criteria i verktøylinjen. Her bestemmes om man skal bruke SI, Metric eller English, som er viktig for å få lagt inn riktige verdier. Under Criteria kan man også velge Member Loads, hvor man gjør bestemmelser for hvilke regler som skal gjelde for lastene. Dette innebærer å velge byggekode, om taklaster skal være reduserbare og om programvaren skal ta hensyn til snølast eller taklast (Bentley, 2024). Under Criteria har man også muligheten til å velge hvilke elementer det skal beregnes egenvekt for (Bentley, 2024). Når disse kriteriene er satt, får man tilgang til neste modul i RAM-Structural System, som er RAM Modeler, og denne blir beskrevet i kapittel 2.6.5.

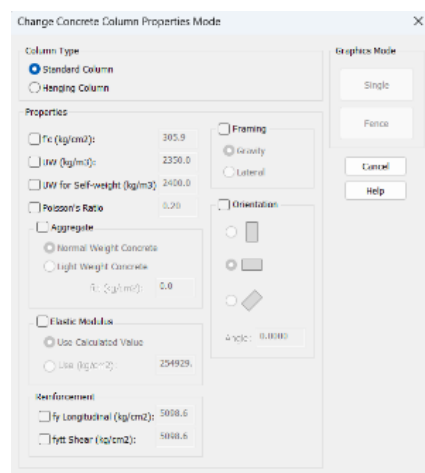
Siden RAM Manager er selve portalen til RAM-Structural System er det også herfra man importerer fra andre tredjeparts programvarer, og et slikt program som brukes i denne oppgaven er Revit. For å importere en modell fra et tredjepartsprogram inn til RAM-Structural System brukes dens integrerte funksjon med iTwin, dette gjøres fra File-menyen i RAM Manager. Ved å bruke denne får man først opp en pop-up som gir to valg; Pull From File og Push To File, på samme måte som i Revit. Pull From File brukes når en modell skal importeres inn, mens Push To File brukes når en modell skal eksporteres ut. Når man velger Pull From File velges ISM filen som inneholder den riktige modellen. I samme prosess opprettes også en ramss fil som skal brukes i selve programmet. Filformatet ramss er RAM-Structural System sitt eget filformat. Når riktig fil er valgt vil modellen automatisk åpnes i iTwin, dette skjer fordi brukeren skal ha mulighet til å se og velge hvilke elementer fra modellen som skal importeres til RAM-Structural System. Man velger de elementene som skal overføres ved å klikke på et og et element, eller å velge Select All. Videre trykkes Accept før man velger Update for å gå ut av iTwin. For å fullføre importeringen må RAM-Structural System også vite hvilke koordinater modellen skal

ha og om den har nodes opprettet fra før, og når dette er lagt inn er modellen lagt inn i RAM-Structural System (Bentley, 2024).

2.6.5 RAM Modeler

RAM Modeler brukes til å opprette, vise og revidere modellene som brukes i RAM-Structural System og her kan ingeniører designe alt fra enkelte strukturelle komponenter til komplette bygninger av stål og betong (Bentley, 2023). For denne oppgaven brukes RAM Modeler både for importert modell fra Revit og opprettelse av ny modell. For importering av eksisterende modell brukes RAM Modeler til å opprette og påføre linjelast. Oppgavens mål tar ikke hensyn til modelleringsaspekter, derfor forklarer vi kun det som er relevant for denne oppgaven uten å gå dypere inn i hvordan disse fungerer.

For å modellere i RAM Modeler opprettes først etasjer, etterfulgt av grids som søyler, bjelker og betongplater kan plasseres etter. Layout er det største verktøyet i RAM Modeler hvor man kan se og endre geometriske data og materialegenskaper for de ulike elementene. Når geometrien for modellen er opprettet må man under Layout legge inn materialegenskaper (Figur 19) for betongen og armeringen, i tillegg til UW og UW for selfweight. UW står for Unit Weight og denne brukes for å beregne elastisitetmodulen. UW for selfweight er det som programvaren bruker for å beregne egenvekten (Bentley, 2023). Disse er vesentlige fordi de påvirker analyseresultatet og armeringsdesignet som utføres senere i prosessen.



Figur 19: Bestemmelse av materialegenskaper for søyle i RAM Modeler

I RAM Modeler opprettes og påføres også laster, og i denne oppgaven brukes linjelast som permanent last og snølast som variabel last. Disse opprettes under Loads som ligger i PropTable i verktøylinjen (Bentley, 2023). Her opprettes et navn til lasten og størrelsen på den. For å plassere lastene brukes også Layout, der man velger Loads og finner den lasten som nettopp er opprettet. Når denne velges, kan man plassere lasten ved å trykke på elementene i modellen. For å se modellen i 3D kan man via 3D-View i verktøylinjen visualisere den ferdige modellen (Bentley, 2023).

2.6.6 RAM Concrete

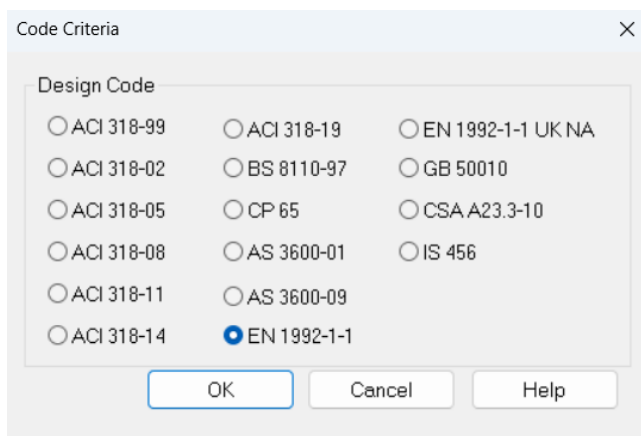
RAM Concrete er en samling av moduler som brukes til FEM-analyse og armeringsdesign av betongbjelker, bjelkelag, søyler og vegger. Den består av fire moduler; Concrete Analysis, Concrete Beam, Concrete Column og Concrete Wall (Bentley, 2024). I dette forsøket vil det ikke bli brukt Concrete Wall, da modellen av oppgaven ikke har vegger.

2.6.6.1 Concrete Analysis

Bentley beskriver på sin hjemmeside at Concrete Analysis innebærer beregning og vurdering av strukturelle elementer laget av betong, som i oppgavens tilfelle er bjelker og søyler. FEM-analysen tar hensyn til vertikale laster som påvirker strukturen. Concrete Analysis har fire faner (Bentley, 2024) som blir brukt i denne oppgaven, disse er Criteria, Assign, Process og Reports. Disse vil bli beskrevet i detalj i neste delkapittel.

2.6.6.1.1 Criteria

Criteria i verktøylinjen i Concrete Analysis brukes til å sette kriteriene som påvirker analysen. Under denne er Code (Figur 20) det første som bestemmes, og det er her den riktige byggekoden velges. Byggekodene velges ut ifra hva som gjelder for brukerens lokasjon, som for denne oppgaven er Eurokode 2. Det er viktig å velge riktig byggekode siden kravene for de ulike kodene kan være



Figur 20: Dialogboksen for valg av byggekoder

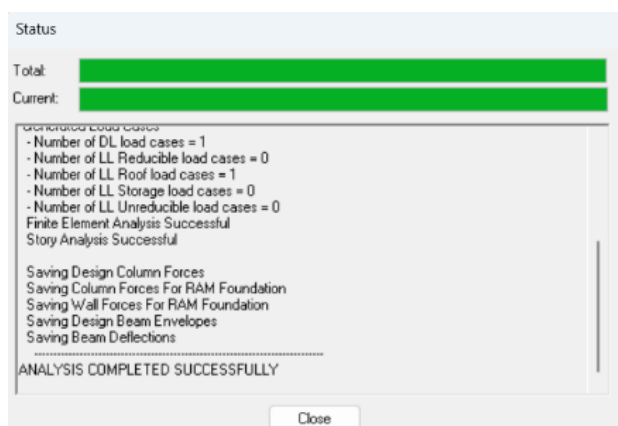
svært forskjellige. Det andre som er brukt i denne oppgaven under Criteria er Analysis. I Analysis er det innstillinger som er sentrale for å tilpasse og optimalisere analysen. Analysis Stations er punkter langs en bjelke hvor krefter beregnes for å evaluere designet. Beam Torsion Stiffness, "J", er basert på bjelkens bredde og er avgjørende for strukturens integritet under torsjonskrefter. Håndtering av laster inkluderer alternativer for å Skip Load eller anvende Live Load Reduction, som begge påvirker hvordan laster påvirker modellen. Pinning av søyler gir mulighet for å "pin" basen på søyler ved fundamentet for å redusere rotasjonsstivheten, noe som endrer strukturens oppførsel under belastning. Disse funksjonene er integrert for å gi nøyaktige og tilpassede analyser som støtter sikker og effektiv strukturell design (Bentley, 2024).

2.6.6.1.2 Assign

Assign brukes hovedsakelig til å overstyre de globale kriteriene som definert tidligere. Under Assign kan man endre tverrsnittstørrelser på bjelker og søyler via Size, endre innfestningen av disse via Fixity og tilegne Beam Lines. Beam Lines er et konsept som brukes gjennom hele programmet fordi det definerer hvilke bjelker som skal utformes som en enkelt kontinuerlig bjelke. Dette er viktig for å få en mere nøyaktig analyse. Beam Lines kan tilføres automatisk av programvaren eller manuelt av brukeren (Bentley, 2024).

2.6.6.1.3 Process

Process brukes til å utføre analysen og for å visualisere resultatene på modellen. Process består av to moduler, Analyze og Results. Velger man Analyze vil programmet utføre en FEM-analyse av modellen der prosessen delt inn i tre faser, som er forbehandling, analyse og etterbehandling (Bentley, 2024). Når alle etasjene er analysert, kommer det fram en fremdriftslogg (Figur 21) som



Figur 21: Fremdriftsloggen ved bruk av Analyze

brukeren kan bla igjennom for en oppsummering av analysen. Etter en analyse vil Results-menyen være tilgjengelige. Resultatene fra analysen kan man se i 3D og det er mulighet for å se vertikale krefter, krefter på medlemmer og forskyvninger for hvert lasttilfelle som virker på modellen (Bentley, 2024). Disse beskrives nærmere i kapittel 2.8.2.1.

2.6.6.1.4 Reports

Reports er utviklet for å gi ingeniøren all nødvendig informasjon for å gjennomgå resultatene knyttet til analysen i søyler og bjelker. Rapportene gir en omfattende oversikt over modellen, inkludert lister over alle elementer, etasjedata og tverrsnittsdimensjoner for bjelker og søyler. I tillegg til å presentere dette, genererer rapportene også oppsummeringer av vertikale reaksjoner, samt oversikt over påførte og distribuerte laster på bjelkene (Bentley, 2024).

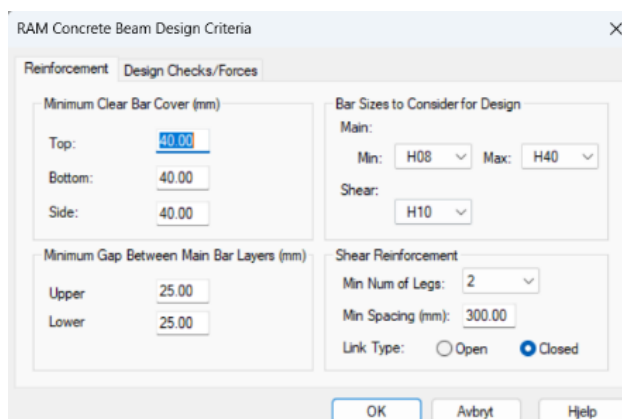
2.6.6.2 Concrete Beam

Concrete Beam fokuserer på dimensjonering og detaljering av betongbjelker for å oppfylle strukturelle krav og sikkerhetsstandarder. Dette innebærer beregning av nødvendig armering for å motstå de aktuelle lastene, inkludert bøyning, skjæring, og kryp- og svinnforhold. Designprosessen tar hensyn til faktorer som materialstyrke, spenninger, deformasjoner og

bruksbegrensninger. Kriteriene følger relevante byggekoder og krav valgt av brukeren, men designet blir kun gitt innenfor de kravene satt i byggekoden. Concrete Beam har fire faner som må innstilles for å kunne utføre designprosessen på bjelken på forsvarlig måte. Disse er Criteria, Assign, Process og Reports (Bentley, 2024). Disse vil bli beskrevet i detalj i neste delkapittel.

2.6.6.2.1 Criteria

Criteria brukes for å sette designkriteriene for armeringen. Siden RAM-Structural System skal lage et armeringsdesign automatisk er det viktig å sette kriterier for hvilke størrelser armeringen skal ha og hvor plasseringen av denne skal være. Under Criteria (Figur 22) i verktøylinjen defineres overdekning, minimum avstand mellom



Figur 22: Kriterier for bjelkearmering hvor overdekning, størrelser og avstander legges inn

armeringslag og minimum senteravstand. I tillegg velges minimum og maksimum diameter på armeringen. Dette er viktig hvis det er spesifikke krav ingeniøren skal ta hensyn til, men ellers vil designet uansett hensynta byggekodens krav (Bentley, 2024).

2.6.6.2.2 Assign

Assign brukes til å overstyre de kriteriene som er satt tidligere. Dette gjelder både tverrsnittstørrelse på bjelken og de kriteriene satt under Criteria (Bentley, 2024).

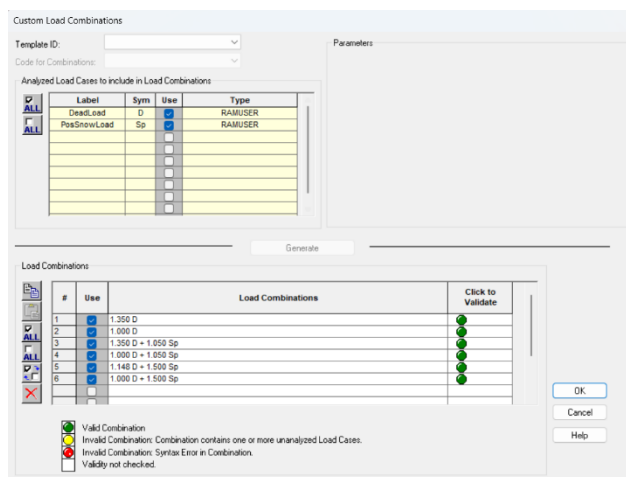
2.6.6.2.3 Combinations

Lastkombinasjonene legges til under Custom Combinations (Figur 23) i verktøylinjen. I dialogboksen som da kommer opp velger man byggekode under Code For Combinations og

dette gjør at de ulike kombinasjonene for byggekoden dukker opp. Disse kan her endres, eller man kan trykke Generate for å legge de til (Bentley, 2024).

2.6.6.2.4 Process/Reports

Process inneholder kommandoer som lar brukeren utføre bjelkedesign og samhandle med designresultatene. Design All lar programvaren utføre et armeringsdesign av bjelken ut ifra de kriteriene som er satt



Figur 23: Opprettelse av lastkombinasjoner basert på byggekoder

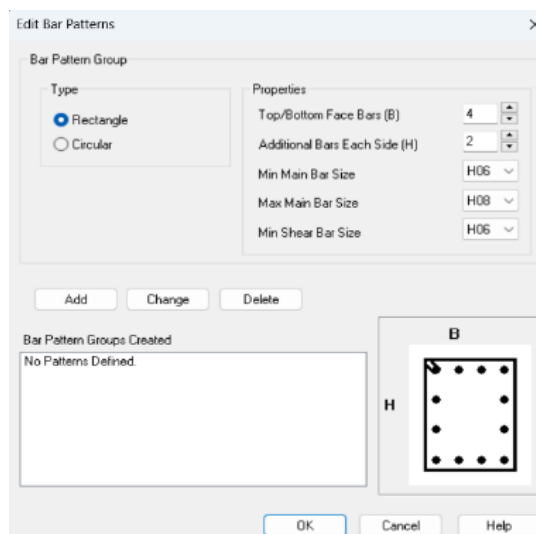
tidligere. For å se og endre resultatet av designet velger man View/Update, dette er beskrevet nærmere i kapittel 2.8.2.2. Under Reports er det tilgjengelige ulike rapporter som brukes til å gjennomgå informasjon om modellen og dens design (Bentley, 2024). Rapportene gir ingeniører viktig data for armeringsdesign av betongbjelker. Rapportene inkluderer Criteria som beskriver designkrav og brukerdefinerte armeringsoppsett, Load Combinations med detaljer om alle genererte og brukerdefinerte kombinasjoner, og Beam Design med omfattende informasjon brukt i bjelkedesign. Videre gir Beam Design Summary grunnleggende designdetaljer for detaljering og kostnadsestimering, Beam Deflection Summary med beregninger og forhold, og Material Take Off som viser kvantiteter og vekt av betong og armering for alle bjelker (Bentley, 2024).

2.6.6.3 Concrete Column

Concrete Column omhandler dimensjonering og armering av betongsøyler for å oppnå tilstrekkelig bæreevne og stabilitet. Dette inkluderer vurdering av dimensjonerende aksialkraft, moment og skjærkrefter som påvirker søylene. Søyledesignet tar hensyn til søylehøyde, eksentrisitet, forbindelsesdetaljer og lastkombinasjoner. En viktig del av designprosessen er beregning og analyse av moment-interaksjonskurver for å vurdere søylekapasiteten under forskjellige lastkombinasjoner. Designet baserer seg også her på kriteriene fra relevante byggekoder og krav valgt av brukeren. Concrete Column har fire faner som må innstilles for å kunne utføre designprosessen på søylene på forsvarlig måte. Disse er Criteria, Assign, Process og Reports (Bentley, 2024). Disse vil bli beskrevet i detalj i neste delkapittel.

2.6.6.3.1 Criteria

Criteria brukes til å sette kriterier som påvirker designet av armeringen i søylene. I Column Design kan man bestemme overdekningen, som er tykkelsen av betonglaget som dekker armeringsjern og viktig for beskyttelse mot korrosjon, brannmotstand og holdbarhet. Column Lap Splice brukes kun til å beregne en mer nøyaktig lengde på langsgående stenger for materialuttaksrapporten (Bentley, 2024).



Figur 24: Krav for størrelser og armeringsmønster legges inn under Criteria

2.6.6.3.2 Assign

Ifølge (Bentley, 2024) kan man i Assign endre tverrsnittstørrelser på søylene, opprette armeringsmønstre og tildele disse. Under Edit Bar Patterns (Figur 24) bestemmes antall stenger og minimum- og maksimum diameter av disse. For å tilegne dette til søylene velges Bar Patterns og man trykker da på de søylene som skal ha det opprettede armeringsmønsteret.

2.6.6.3.3 Process/Reports

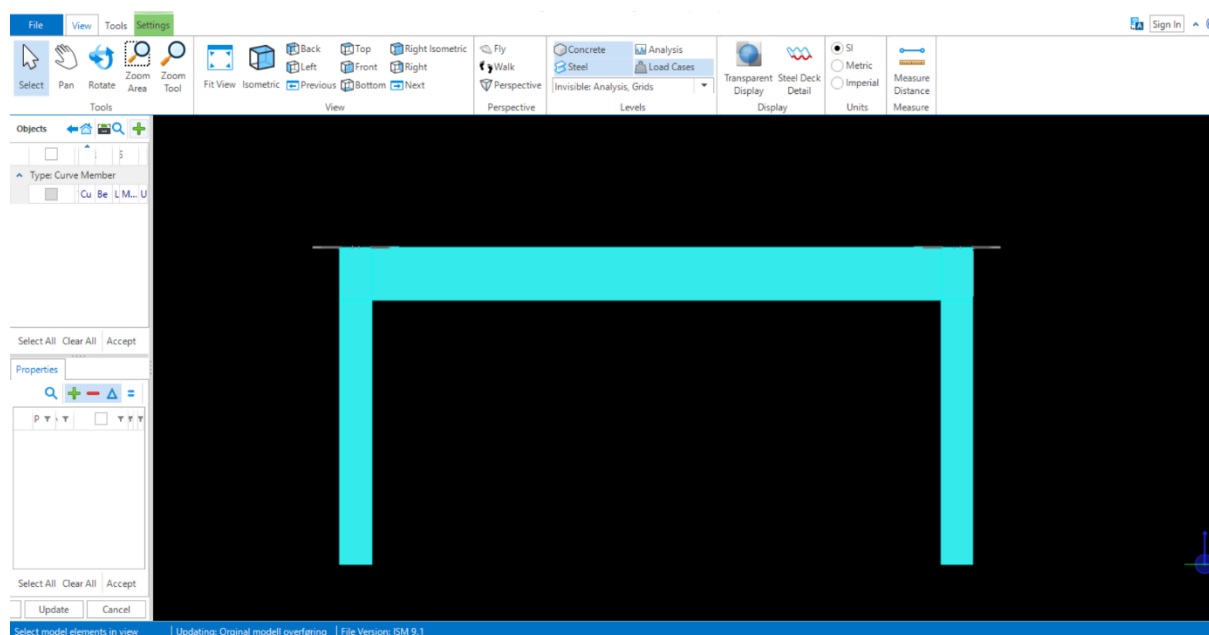
Process inneholder kommandoene Design All og View/Update som lar brukeren utføre bjelkedesign og samhandle med designresultatene på samme måte som beskrevet i Concrete Beam. Dette er beskrevet nærmere i kapittel 2.8.2.2. Under Reports er det tilgjengelige ulike rapporter som brukes til å gjennomgå informasjon om modellen og dens design. Rapportene inkluderer Criteria som lister designkriterier og brukerdefinerte seksjons- og armeringsmønstre, Load Combinations med alle genererte og brukerdefinerte lastkombinasjoner, Column Design med detaljerte data brukt i søyledesign, Column Design Summary som gir grunnleggende informasjon for detaljering og kostnadsestimering, og Material Take Off som viser betongvolum, armeringsmengde og vekt for alle designede søyler (Bentley, 2024).

2.6.6.3.4 Combinations

Combinations brukes for å opprette lastkombinasjonene på samme måte som beskrevet under Concrete Beam. Dette er ikke nødvendig å gjøre hvis det allerede er opprettet i Concrete Beam, da disse følger med til Concrete Column.

2.6.7 Eksportering av modell fra RAM-Structural System

Når brukeren har godkjent designforslagene fra RAM-Structural System, kan modellen eksporteres tilbake til Revit ved hjelp av iTwin. Prosessen initieres i RAM Manager ved å velge funksjonen Push To File. Ved aktivering av denne funksjonen lastes modellen inn i iTwin, hvor man får mulighet til å visuelt vurdere designresultatene (Figur 25). Her kan brukeren foreta selektiv godkjenning eller avvisning av spesifikke elementer for import til Revit. Dette gjøres ved å velge elementene som skal eksporteres med «Select», «Accept» og «Update». Etter godkjenning av modellen oppdateres ISM med de valgte elementene (Bentley Structural, 2023). Disse elementene er deretter klare for import til Revit.



Figur 25: Visualisering av modellen i iTwin ved overføring fra RAM-Structural System

2.6.8 Importering til Revit

For å importere modellen til Revit velger man Pull From File i samme plass som beskrevet i kapittel 2.6.2, og da kommer dialogboksen ISM Revit Plug In frem. Først skal materialet som modellen står av tilegnes, og dette gjøres ved å trykke Match All slik at iTwin automatisk finner samsvarende material, eller Create New hvor nytt material opprettes. Videre gjøres dette også for elementenes tverrsnitt, samt laster og størrelsen på disse. Når denne informasjonen er koblet til Revit vil modellen importeres (Bentley, 2024).

2.7 Resultatvisning og armerings sjekker

Når man bruker FEM for å analysere bygningskonstruksjoner, er det avgjørende med en nøyaktig og detaljert visualisering av analyseresultatene for å oppnå forståelige og brukbare resultater av 3D-armering. Georgios Stavropoulos et al. (2014) Understreker viktigheten av

dette: «Visualisering er ikke bare stadig mer nødvendig etter hvert som datamengde vokser, men blir også stadig vanskeligere å trekke ut meningsfull informasjon, og blir dermed en essensiell del av ytelseevalueringen i moderne bygningsdesign, (Stavropoulos, Krinidis, Ioannidis, Moustakas, & Tzovaras, 2014)».

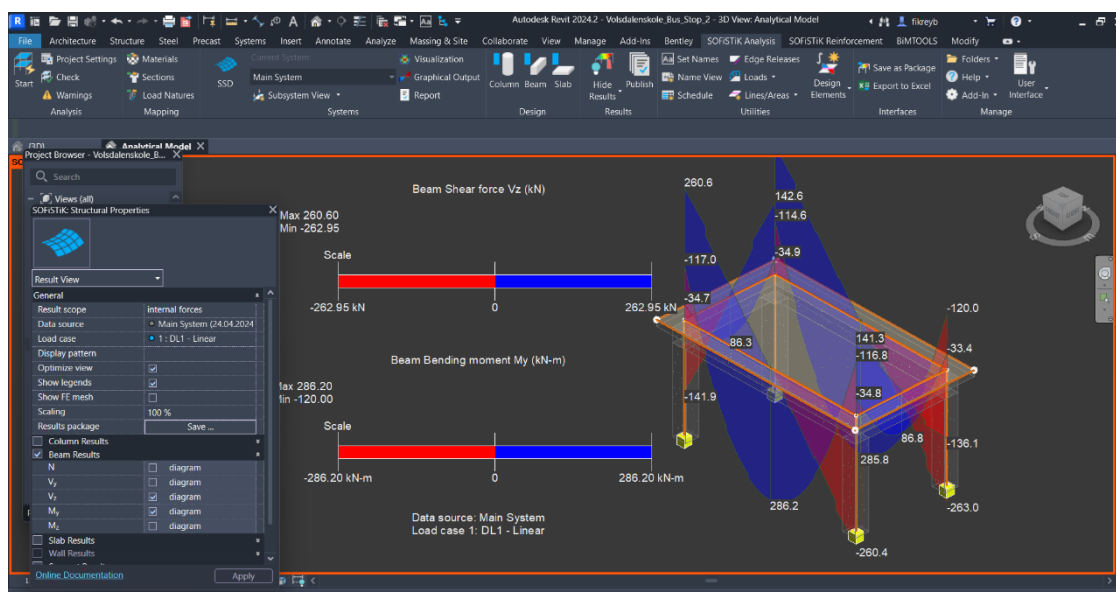
SOFiSTiK og RAM-Structural System har hver for seg sin egen visualisering mulighet. I det følgende delkapittel vil det beskrives hvordan hver enkelt programvare visualiserer analyse og design resultatene.

2.7.1 SOFiSTiK

Basert på SOFiSTiK-dokumentasjonen (SOFiSTiK, 2024) inkluderer funksjonaliteten til resultatvisningen av verktøyet flere nøkkelkomponenter. Resultatvisualiseringen av de ulike resultater foregår innenfor Revit, noe som hjelper ingeniøren med å se modellen ved siden av resultatvisningene. Brukermanualen tilbyr klare instruksjoner for hvordan de forskjellige funksjonene virker for å visualisere resultatene. Visualisering av muligheten er delt i tre; analyseresultater, designresultater og armering sjekker.

2.7.1.1 Analyseresultater (Interne Krefter og Forskyvninger):

SOFiSTiK gir brukerne muligheten til å visualisere resultater for lineære lasttilfeller og globalt definerte lastkombinasjoner. Dette er avgjørende for å forstå hvordan strukturen oppfører seg under de påførte belastningene. Resultatene kan skreddersys basert på orienteringen av kutelinjene, noe som gir ingeniører presis informasjon om interne krefter og forskyvninger, og hjelper dem med å se modellen i Revit parallelt med resultatvisningene.



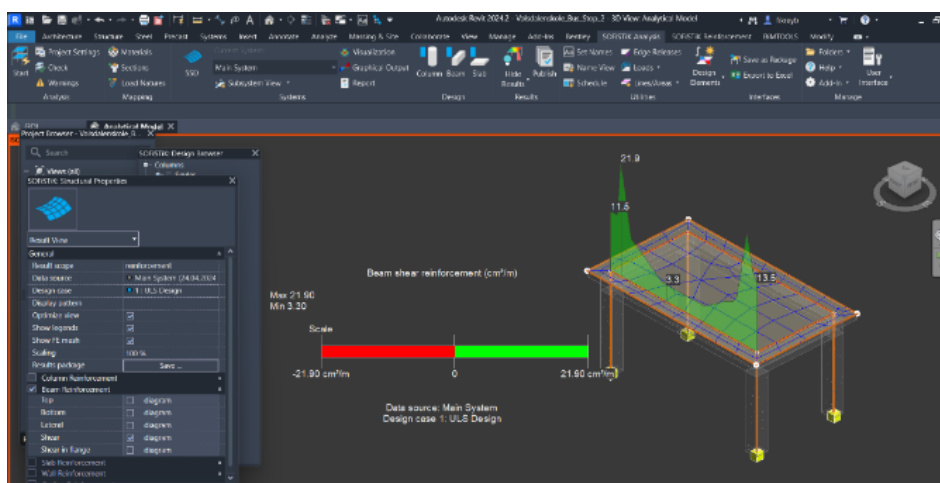
Figur 26: Slik viser SOFiSTiK resultatene av de interne krefter i Revit.

2.7.1.2 Designresultater (Armering):

Tilgjengeligheten av designresultater for armering er avhengig av designgruppene som er til stede i prosjektet. SOFiSTiK-resultatvisningen tillater en detaljert fremvisning av armerings krav:

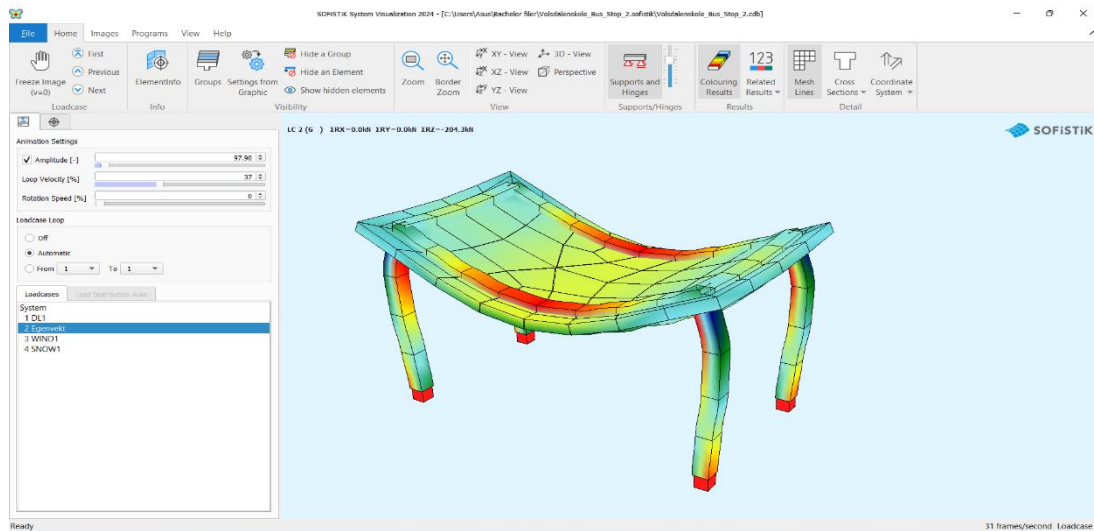
1. *ULS Design: Dette viser nødvendig armering kun for ULS-design og er tilgjengelig for søyler, bjelker og plater.*
2. *ULS + SLS Design: Her vises nødvendig armering for en konvolutt av både ULS- og SLS-design, og dette er spesifikt tilgjengelig for plater.*
3. *ULS Design (maks. by gruppe): Viser nødvendig armering kun for ULS-design basert på den maksimale gruppen, og er tilgjengelig for søyler.*

Tilpasninger av hvordan resultater vises er mulig ved å justere visningsinnstillingene. Dette åpner for alt fra fargekoding til endringer i skalaen, slik at det blir lettere å forstå resultatene (SOFiSTiK, 2024).



Figur 27: Visning av bjelkens armering resultater fra SOFiSTiK

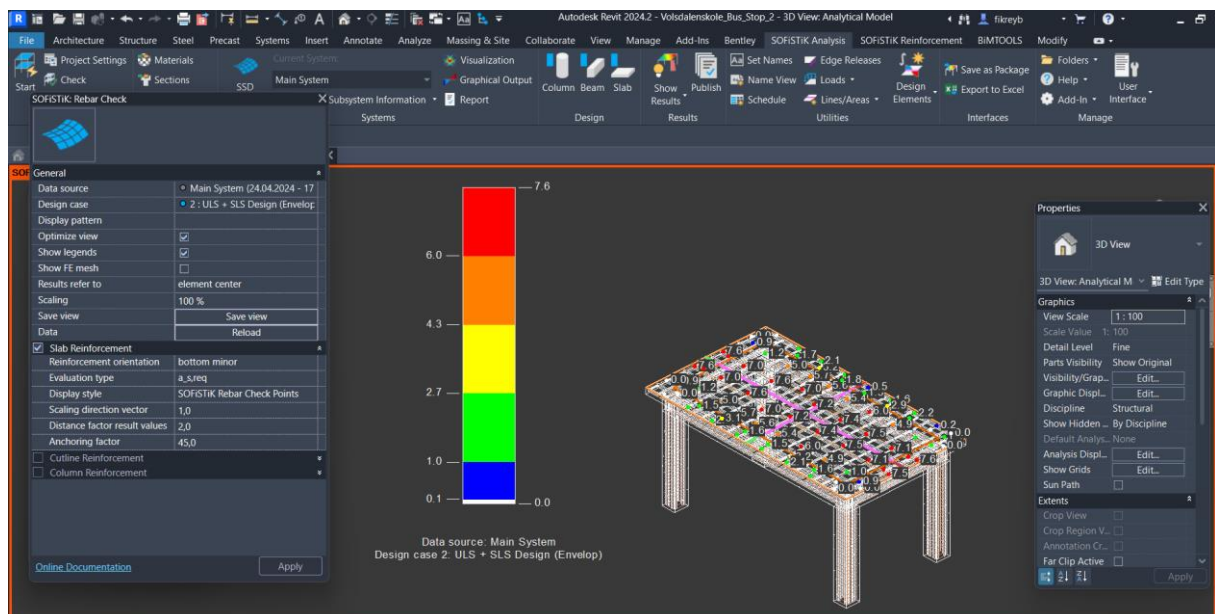
Videre tilbyr SOFiSTiK avanserte verktøy for visualisering gjennom SOFiSTiK System Visualization, som kan brukes sammen med Revit. Dette verktøyet, som er en del av SOFiSTiK Analysis + Design-pakken, lar ingeniører se hvordan konstruksjonen oppfører seg dynamisk under ulike typer belastning ved hjelp av løkker og animasjoner. Beskrivelsen er viktig for oppgaven for å se SOFiSTiKs fleksibilitet under design av 3D-armering.



Figur 28: SOFiSTiK visningsverktøy utenfor Revit

2.7.1.3 Armerings sjekker:

SOFiSTiKs Rebar Check-funksjon er en visualiseringsfunksjon som viser en sammenligning mellom tegnet og nødvendig armering for betongkonstruksjoner. Denne funksjonaliteten fungerer med både søyler og plater, enten det er takplater eller golvplater av betong. Ifølge SOFiSTiK-dokumentasjonen, er verktøyet designet «for å gi en rask, generell oversikt over nødvendig og levert armering (SOFiSTiK, 2024)». Imidlertid anbefaler SOFiSTiK at «det er brukerens ansvar å gjennomføre en grundig inspeksjon av armeringen for å sikre at alle strukturelle og statiske detaljer møter kravene (SOFiSTiK, 2024)».



Figur 29: SOFiSTiK armering sjekker visnings mulighet

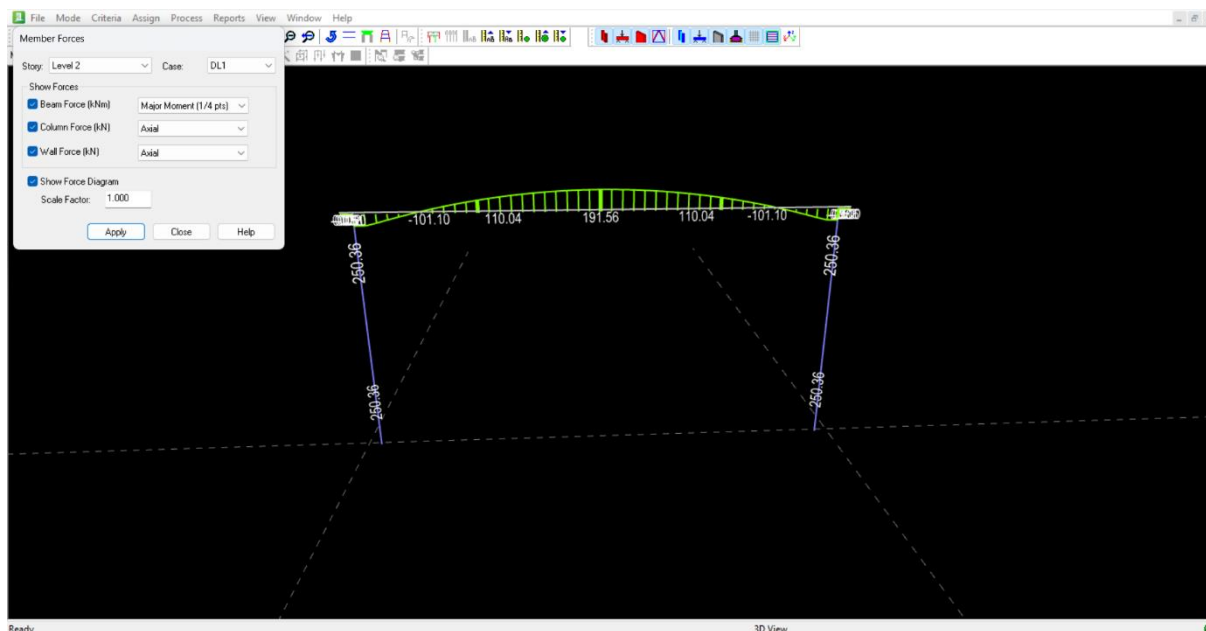
I denne oppgaven skal vi bruke det til å svare på oppdragsgiverens ønske, som ble gitt muntlig, om å undersøke om programvaren kan identifisere eventuelle menneskelige feil som ble gjort under designprosessen av armeringen og om disse feilene kan detekteres av programvaren. Hvordan armeringssjekken fungerer i praksis og dets begrensninger vil følges opp i neste kapittel i metodedelene. Det er imidlertid essensielt å nevne her at sjekkeren virker «ved å fargelegge beregnede resultater basert på den evalueringemetoden som er valgt for plateelementene (SOFiSTiK, 2024)».

2.7.2 RAM-Structural System

Resultatvisningen i RAM-Structural System vil beskrives i to deler; Analyseresultater og armeringsdesign. Innenfor disse er det flere verktøy for å visualisere resultatene, og disse blir beskrevet i de påfølgende delkapitlene.

2.7.2.1 Analyseresultater

Når analysen er fullført, kan man visualisere ulike resultater direkte på skjermen i 3D på modellen. I Concrete Analysis er det fire måter å visualisere resultatene på; FE Model Info, Vertical Reactions, Member Forces og Displacements. FE Model Info lar ingeniøren se opprettet mesh, bjelke- og søylefikseringer og nodes som programvaren har opprettet. (Bentley, 2024). Vertical Reactions visualiserer reaksjonskreftene som virker for hvert lasttilfelle

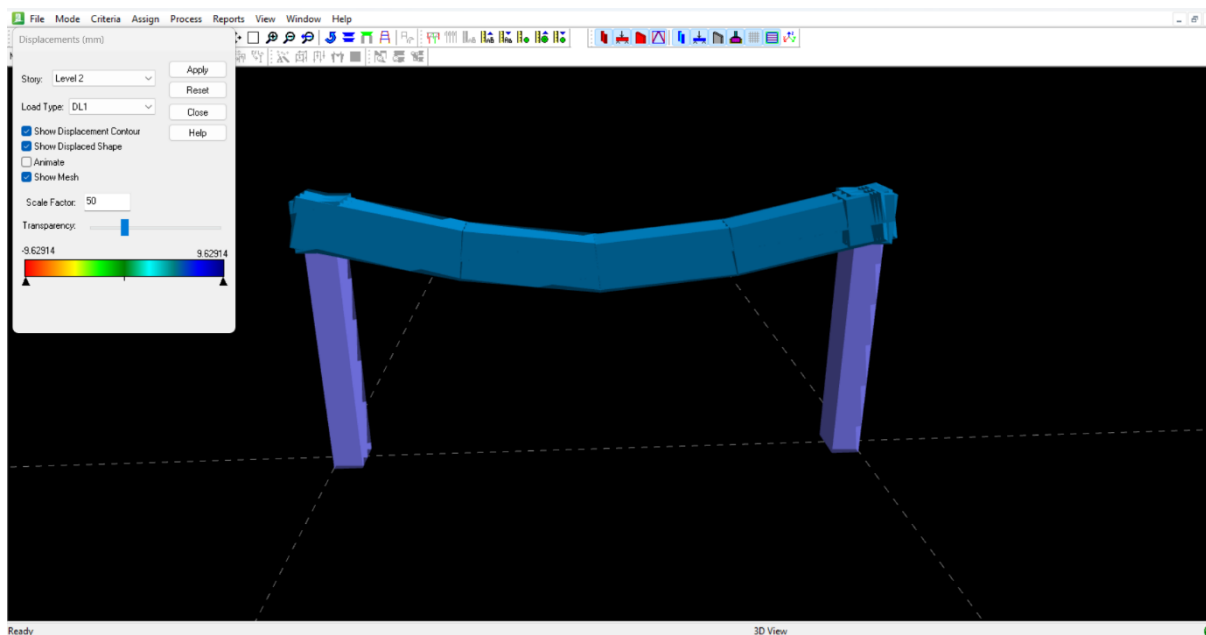


Figur 30: Visualisering av Member Forces distribueringen av krefter etter analysen

(Bentley, 2024). I Member Forces (Figur 30) kan brukere visualisere og analysere kreftene i bjelker og søyler for spesifikke belastningstilfeller. Kraftene vises på elementene i modellen og man kan velge å vise forskjellige typer krefter som moment, skjær og torsjon. Visualiseringen

gir detaljert fremstilling av hvordan kreftene distribueres og påvirker den valgte strukturen (Bentley, 2024).

I Displacements kan brukere visualisere forskyvninger, og dette inkluderer muligheten til å se forskyvningene dynamisk for hvert lasttilfelle (Figur 31). Det er også muligheter for å justere skala og gjennomsiktighet for forskyvningene, og en fargepalett hjelper til med å illustrere forskjellige forskyvningsmagnituder visuelt (Bentley, 2024).



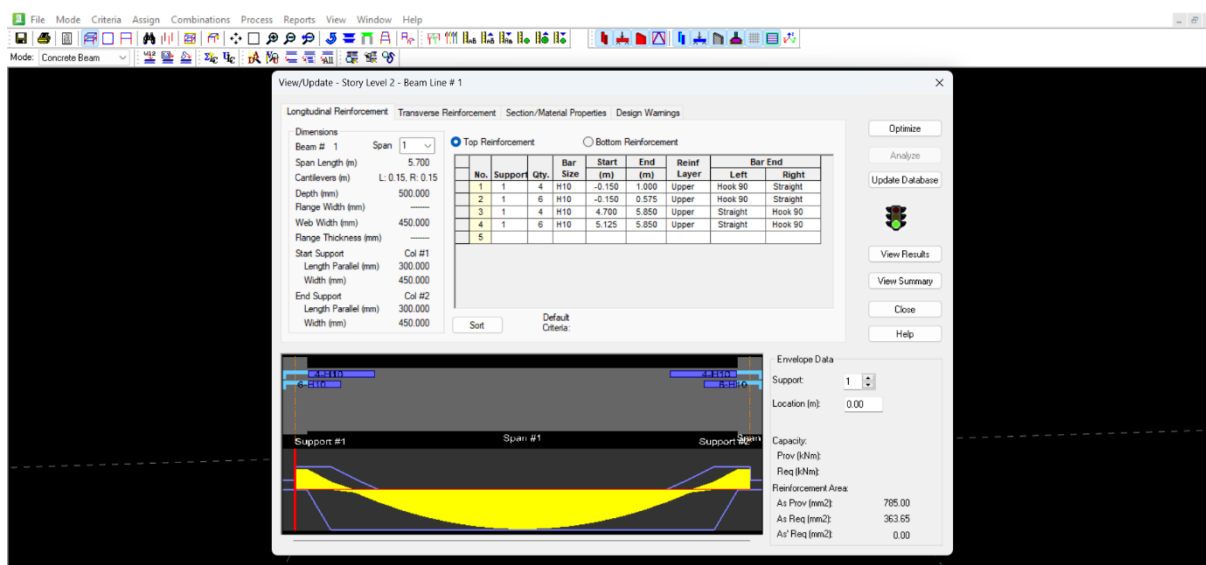
Figur 31: Visualisering av forskyvningene etter analysen

2.7.2.2 Armeringsdesign

Dialogboksen View/Update (Figur 32) er et verktøy for å undersøke designet av bjelker og søyler. Funksjonene gir brukeren mulighet til å evaluere og justere armeringsdesignet. Her presenteres brukeren for en dialogboks som viser elementets nummer og plassering i etasjen (Bentley, 2024). Denne dialogboksen gir flere alternativer for handlinger. Funksjonen Optimize forkaster alle endringer brukeren har gjort og optimaliserer designet basert på forhåndsdefinerte kriterier. Update database-funksjonen lagrer endringene i designet og oppdaterer modellens database. Analyze-funksjonen utfører en ny analyse basert på de seneste endringene gjort av brukeren. View Results viser de fullstendige designresultatene i rapportformat, mens View Summary tilbyr et sammendrag over designet (Bentley, 2024).

For bjelker tilbyr funksjonene for langsgående og skjærarmering visninger og redigeringsmuligheter. Den langsgående armeringen for bjelkene vises både i 2D og numerisk, og gir informasjon om armeringssettets størrelse, antall og plassering langs elementet.

Informasjonen i tabellen inkluderer nummerering, tilknyttede støttepunkter og nøyaktige posisjoner. Skjærarmeringen, på sin side, gir en representasjon i 2D og numerisk. Detaljer som stangnummer, spenn, størrelse, antall ben og type armering er angitt, sammen med start- og sluttposisjoner for armeringen. Material/Properties detaljert informasjon om både bjelkeegenskaper og materialkvaliteter. Dette omfatter lengden og tverrsnittstørrelsen på bjelken, samt detaljer om skjærarmeringen. I tillegg vises materialkvaliteter som flytspenning



Figur 32: Funksjonen View/Update hvor resultat av armeringsdesign og eventuelle endringer av dette kan utføres

for armering, betongens trykkfasthet, samt betongens vekt og elastisitetsmodulus (Bentley, 2024).

For søylene vises informasjon om gjeldende armeringsmønster for langsgående armering i en tabell som inkluderer størrelser og antall. Skjærarmeringen vises i tabell med informasjon om størrelse, bøyelform og start- og slutt punkt i søylen. Section Material Properties viser spesifikasjoner som betongstyrke, tverrsnittstørrelser og elastisitetsmodul (Bentley, 2024). Ved eventuelle designfeil for både bjelker og søyler vil trafikkløssystemet i dialogboksen lyse rødt og informere brukeren om feilen gjennom en detaljert beskrivelse av problemet, som finnes under fanen for Design Warnings (Bentley, 2024).

2.7.2.3 SOFiSTiK Reinforcement

SOFiSTiK Reinforcement består av flere verktøy som kan integreres i Revit etter installasjon av SOFiSTiK Analysis + Design. Dette verktøyet er ment for detaljering og optimalisering av armering i betongkonstruksjoner. På SOFiSTiKs hjemmeside beskrives SOFiSTiK Reinforcement som følger:

'SOFiSTiK Armering fremskynder prosessen med å lage 2D-armeringstegninger fra 3D-armeringsmodeller i Revit. Produktet består av programvare og en rekke familier, som enkelt kan tilpasses nasjonale eller bedriftsspesifikke standarder. Produksjon av stanglister, bøyelister og kuttlistor for armeringsnett er også inkludert (SOFiSTiK, 2024).

I oppgavens sammenheng vil SOFiSTiK Reinforcement tjene to formål. Det første er å bruke det for armeringssetting og detaljering etter at konstruksjonen er analysert og designet. Dette gjør man i oppgaven slik at man kan sammenligne de nødvendige armeringene fra designresultatet med den levert armering på modellen, som beskrevet i kapittel 2.8.13. Den andre grunnen er å undersøke om SOFiSTiK Reinforcement kan effektivisere 3D-armeringsprosesser i betongkonstruksjoner, som svar på ett av oppgavens mål om å utforske Revits rolle i slike prosesser. Sistnevnte skal ikke utforskes i bred detalj og dybde, men kun for å antyde at det finnes muligheter som kan utforskes videre.

3 MATERIALER OG METODE

Denne delen skal redegjøre for hvordan vi har gått fram for å løse oppgaven og sannsynliggjøre framgangsmåten. Hovedmålsettingen med dette avsnittet er å beskrive alle sider ved prosjektet som er nødvendig for å kunne gjenskape forsøket ved en senere anledning.

3.1 Metode

Denne studien benytter en utforskende forskningstilnærming der vi modellerer betongkonstruksjonen i Revit og RAM-Modeler, etterfulgt av detaljerte FEM-analyse og designprosess ved hjelp av SOFiSTiK og RAM Structural System. Gjennom denne metoden mener vi at vi kan avdekke og vurdere potensialet som ligger i de to programvarene, med tanke på generering og automatisering av armeringsdesign, og deres integrasjon med BIM-verktøyet Revit. Hovedmålet, som er definert av oppdragsgiver, er å utforske og vurdere hva de to programvarene kan tilbyr, med Revit som det sentrale verktøyet.

For å forstå hva som menes med en 'utforskende tilnærming', refererer vi til en forskningsmetodologi som er rettet mot å oppnå nye innsikter, oppdage nye ideer og øke kunnskapen om fenomener. Denne tilnærmingen, beskrevet av Z. Haile (Haile, 2023), er svært fleksibel og dynamisk og kan utvikle seg etter hvert som nye innsikter oppnås. Dette kan føre til endringer i forskningens retning eller fokus. Shayne Flint (Flint, 2009) understreker at slike tilnærminger er essensielle når nye eller komplekse problemstillinger utforskes uten initiale hypoteser. I denne oppgaven benyttes en utforskende tilnærming for å utforske hvilket potensial

ligger det i SOFiSTiK og RAM FEM-analyseprogrammer for integrasjon med BIM verktøyet Revit, spesielt med tanke på generering og automatisering av armeringsdesign.

3.2 Case-studier

For å utføre denne utforskningen har vi valgt tre Case-studier som vi mener gir et solid grunnlag for å besvare problemstillingen. En av Case-studiene fokuserer på en konstruksjon vi har valgt å benevne som "basis modulær enhet". Denne strukturen består av fire søyler, fire bjelker og en takplate. De andre Case-studier er: en ramme med to søyler og en bjelke, og en fritttopplagt bjelke med bestemte dimensjoner og belastninger. Ved bruk av disse Case-studiene forventer vi å finne ut hvilket potensial SOFiSTiK og RAM Structural System har når det gjelder generering og automatisering av armeringsdesign, samt integrasjonen med Revit. Dette inkluderer også mer innsikt i hvilken programvare som gir de mest pålitelige og brukbare resultatene med tanke på optimalisering og nøyaktighet i konstruksjonsprosjekter.

3.2.1 Formål med testing:

1. Basis modulær enhet: Denne konstruksjonen modelleres i både Revit og RAM Modeler for å sikre en detaljert og nøyaktig strukturell modellering. Deretter anvendes 'Basis modulær enhet' som en standardisert modell for å utføre FEM-analyse og den tilhørende designprosessen for armeringen i programvarene SOFiSTiK og RAM-Structural System. Ved å benytte denne modellen som et grunnleggende eksempel, ønsker vi å utforske og sammenligne effektiviteten av de ulike armeringsteknikkene for de to programvarene. På denne måten kan vi vurdere potensielle muligheter som disse programvarene tilbyr for å effektivisere og optimalisere designprosessen for 3D-armering, noe som er et ønske fra oppdragsgiveren.
2. Ramme med to søyler og én bjelke: Her vil vi undersøke integrasjonen mellom Revit og RAM-Structural System gjennom eksport-import metoden. Målet er å evaluere hvor sømløs og nøyaktig dataoverføringen mellom disse programmene er, noe som er kritisk for effektiviteten i designprosessen.
3. Fritttopplagte bjelke: Dette scenarioet fokuserer på å teste påliteligheten til SOFiSTiK-programvaren. Ved å utføre kontrollerte håndberegninger sjekker vi om programvarens resultater er fornuftige og brukbare. Fra dette lærer vi hvordan programvaren fungerer i praksis.

Hvert trinn, fra initial modellering til evaluering av simulerte analyseresultater og genererte armeringer for de utvalgte konstruksjoner, dokumenteres grundig for å illustrere både tekniske detaljer og innsiktene de gir til det overordnede designet.

3.3 Materialer

Materialer som ble benyttet for denne oppgave er kun våre egne pc-er.

Studien involverte også bruk programvareløsninger for modellering, FEM-analyse og generering av armering i betongkonstruksjoner. De primære verktøyene inkluderte:

- Autodesk Revit: Brukt for modellering og integrasjon med FEM-analyseverktøy.
- RAM-Structural System: Anvendt for modellering, FEM-analyse, generering og automatisering av armering
- iTwin Analytical Synchronizer: For eksport og import mellom Revit og RAM-Structural System.
- SOFiSTiK: Integrert med Revit for FEM-analyse og generering av armering.
- Mathcad Prime: For håndberegning.

3.4 Framgangsmåten

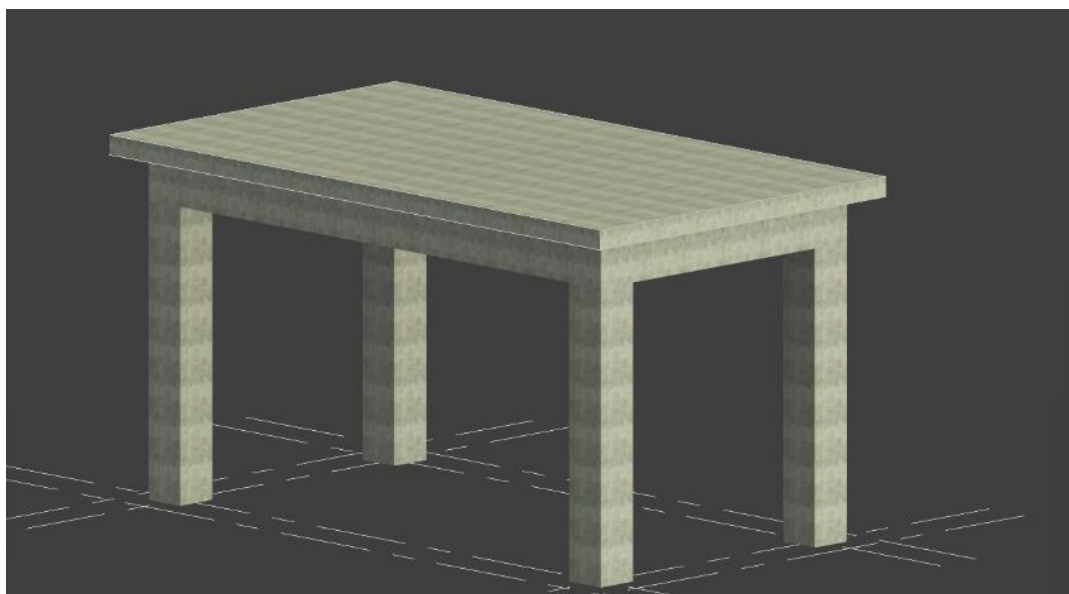
I denne delen av oppgaven skal vi beskrive framgangsmåten vi har brukt så konkret og detaljert som mulig. I Aage Rognsaa sin bok “Bacheloroppgaven” anbefales at framgangsmåten skal beskrives “så detaljert at andre kan gjøre den samme undersøkelsen som du har gjort (Rognsaa, 2015)”. Framgangsmåten handler om tre type konstruksjoner, og formålet med hver av dem er beskrevet i kap. 3.2.1. Som beskrevet i den nevnte kapiteldelen, har Basis modulær enheten et formål, men skal modelleres, analyseres og designes i de to ulike programvarene.

3.4.1 Beskrivelse av basis modulær enheten

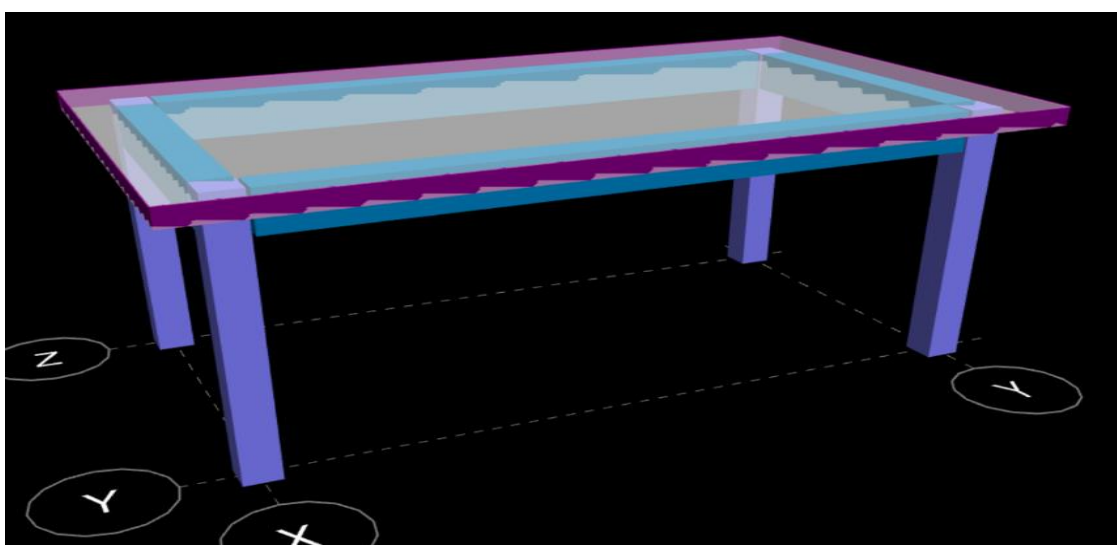
Basis modulær enheten er en betongkonstruksjon som har fire søyler, fire bjelker og en takplate. Enheten er et imaginært busstopp på Volsdalen skolesenter i Ålesund. Vi brukte Revit Structure verktøyet og RAM Modeler for å modellere basis modulær enheten. Enheten har følgende (Tabell 2) geometriske data og tverrsnitt av konstruksjonsdelene:

Tabell 2: Geometriske data av Basis modulær enhet

Konstruksjonsdel	Lengde [m]	Tverrsnitt [mm]	Antall [stk]
Langbjelker	6	300 * 450	2
Kortbjelker	3	300 * 450	2
Søyler	2.7	450 * 450	4
Takplate	Areal = 7 * 4	Tykk = 200 mm	1



Figur 33: Basis modulær enhet som ble lagd i Revit



Figur 34: Basis modulær enhet som ble lagd i RAM Modeler

For fremgangsmåten til Basis modulær enhet (Figur 33 & Figur 34) ble Revit Structure og RAM Modeler, beskrevet i kapitlene 2.5.2 og 2.7.4, brukt til å lage enheten. SOFiSTiK Analytical Model Generator, omtalt i kapittel 2.6.4, ble brukt for å generere analytiske modeller. Revit Analyze, beskrevet i kapittel 2.5.4, ble brukt for å fastsette grensebetingelser og pålegge laster på modellen som er lagret i Revit. Modellen som ble laget i RAM Modeler krever ikke at en analytisk modell eller grensebetingelser opprettes separat, siden dette skjer automatisk når den opprettes i RAM Modeler. Lastene for modellen som ble laget i RAM Modeler ble også bestemt der.

Enheten tar for seg tre typer laster: egenlast, som ble automatisk generert av SOFiSTiK og RAM; permanentlast på 75 kN/m fordelt over alle bjelker; og snølast på 6 kN/m^2 som areallast på takplaten. Lastene ble lagt opp ved bruk av Revit-verktøyet Analyze og RAM Modeler, som er beskrevet i kapitlene 2.5.4 og 2.7.4.

Tabell 3: Lastene som ble lagt på Basis modulær enheten

Type last	Plassering	Mengde[enhet]
Permanentlast	På bjelkene	75 kN/m
Snølast	Areallast (på takplate)	6 kN/m^2

3.4.2 Framgangsmåte mellom Revit og SOFiSTiK

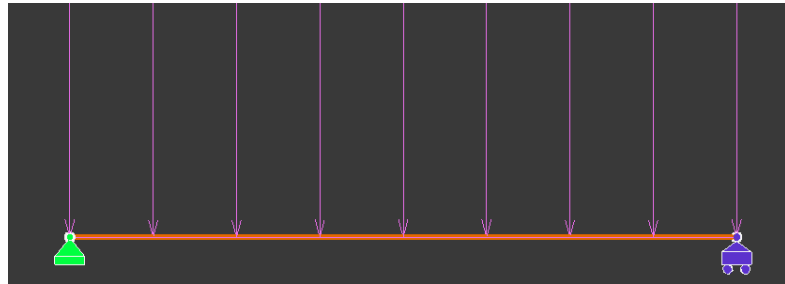
Prosessen av analyse og design av betongkonstruksjonen ved bruk Revit og SOFiSTiK foregår i Revit, og handler om to type konstruksjoner; en Frittopplagt bjelke og en enkelt bygg med fire søyler og en takplate.

For å unngå å gjenta modelleringsprosessen og samspillet mellom Revit og SOFiSTiK vil vi først forklare framgangsmåtene som er like. Deretter tar vi for oss trinnene, ett for ett.

Først modellerte vi betongkonstruksjonene ved bruk av Revit Structure, som ble forklart i kapittel 2.5.3. Vi startet med å modellere alle betongkonstruksjonene som skal analyseres og designes ved bruk av SOFiSTiK i Revit Structure, som omtales i kapittel 2.5.3. Analytiske modeller ble deretter laget med SOFiSTiKs modellgenerator, beskrevet i kapittel 2.6.4. Grensebetingelsene ble fastsatt i Revit Analyze, som er forklart i kapittel 2.5.4, og ved bruk av samme verktøy ble lastene også definert og lagt til.

3.4.2.1 Fritttopplagte bjelke

Fritttopplagt bjelke er en betongbjelke som ble modellert i Revit. Prosedyren som ble beskrevet ovenfor, ble anvendt på den, og bjelken (Figur 35) var nå klar for analyse.



Figur 35: fritttopplagt bjelken og tilhørende last fra Revit

Dataene som ble valgt for fritttopplagt bjelken er:

Geometrien:

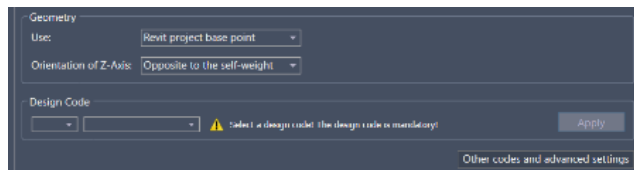
Lengde = 8 m tverrsnitt = $b * h$, $b = 400 \text{ mm}$, $h = 500 \text{ mm}$

Type last:

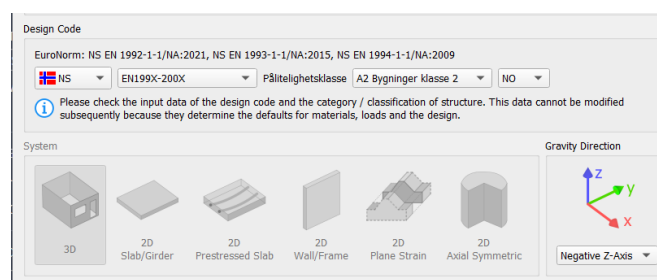
$p = \text{egenlast}$ $q = \text{permanent} = 60 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Egenlasten trenger ikke å defineres manuelt siden SOFiSTiK programvaren automatisk kan beregne denne basert på det bestemte betongtverrsnittet. Videre gikk vi gjennom alle trinnene av sjekkingen og innstillingen av SOFiSTiK.

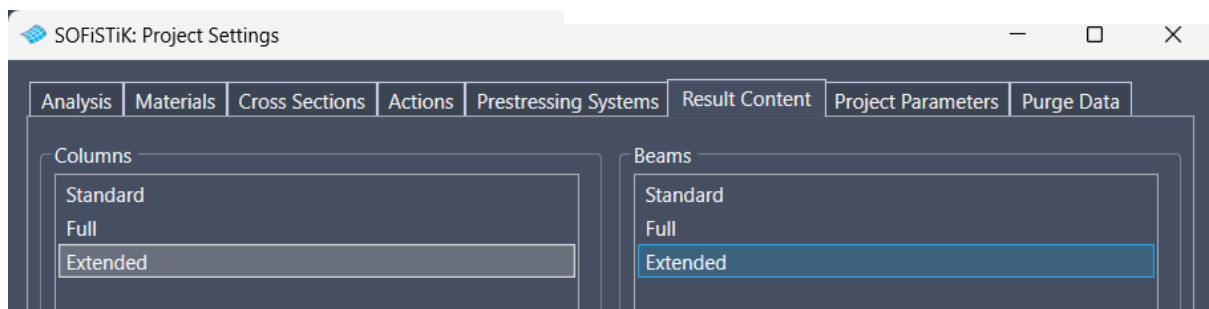
Første brukte vi 'Project Settings' fra SOFiSTiK Analysis, som ble forklart under kapittel 2.6.3 for å bestemme hvilken kode som skal brukes under analysen av bjelken (Figur 41). Vi valgte Eurokode med norsk standard, som er NS-EN 1992-1-1:2004+A1+NA (Figur 41). Under samme fane valgte vi graden av detaljering for resultatinnholdet fra analysen, samt designresultatet. Denne prosessen er ikke endelig, ettersom den



Figur 41: Other codes and advanced settings tar oss til å velge analyse kode som vi vil bruke



Figur 41: Valgte kode for analyse

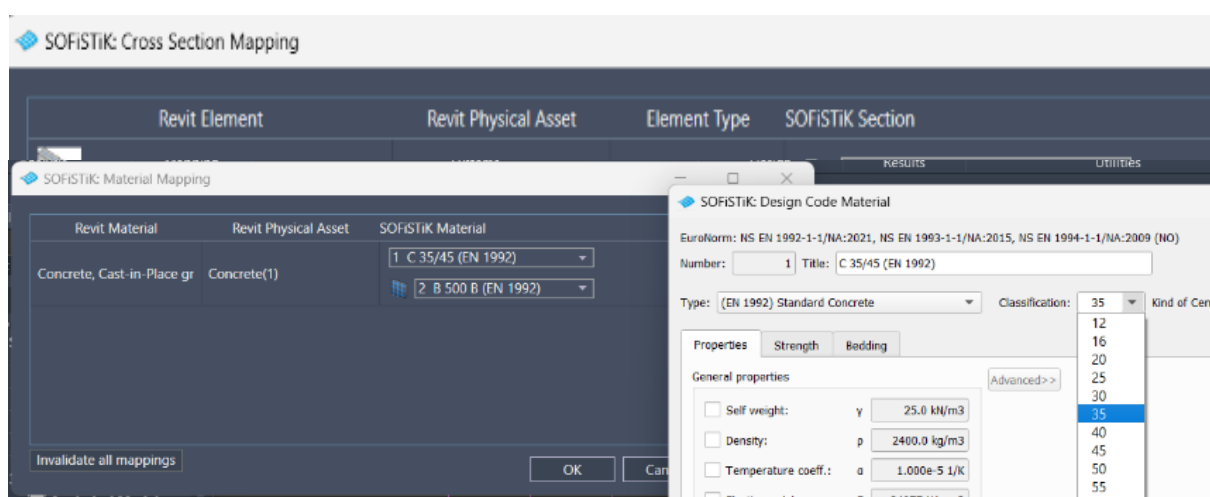


Figur 36: valg av resultats innhold

kan justeres senere i designprosessen. Likevel bestemte vi oss for at resultatinnholdet skal være 'Extended' (Figur 36).

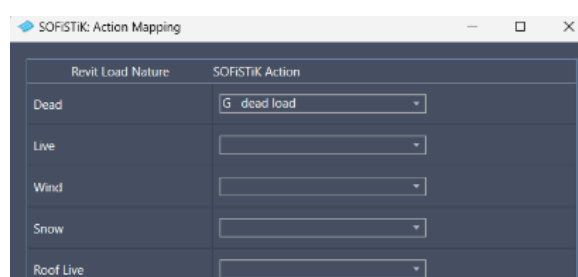
Under 'Material Mapping' sjekket vi hvilke materialer vi hadde (Figur 42). SOFiSTiK bestemmer automatisk, basert på den valgte standarden, at egenskapene til bjelken skal være av betongtype B24 og ståltype B500. Vi hadde muligheten til å endre materialeegenskapene, og endret derfor betongtypen til B35.

Under 'Cross Section Mapping' ble det sjekket om SOFiSTiK hadde den riktige tverrsnitt som vi valgte i Revit, og det var riktig (Figur 43).



Figur 42: Det ble valgt B35 av betongtype for bjelken

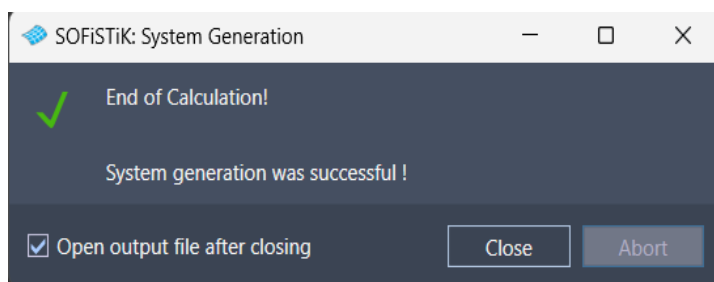
Under 'Cross Section Mapping' bestemte vi hvilken type last vi har på bjelken (Figur 44). Dette er ikke strengt nødvendig, siden laster som ikke påvirker bjelken ikke vil ha noen effekt, men det sørger for at resultatrapporten blir ryddigere. Hvis vi ikke hadde bestemt hvilken type last vi hadde på bjelken, ville programmet beregnet alle lastene uansett, men disse lastene ville hatt null i verdi.



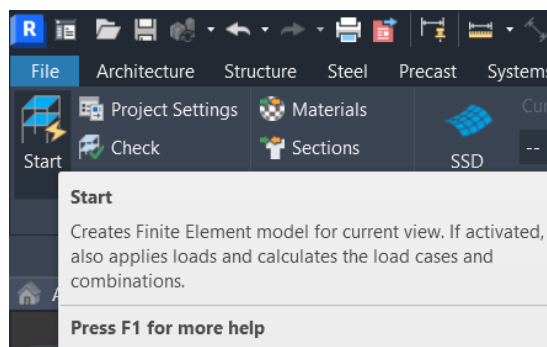
Figur 44: vi bestemte at vi hadde kun permanentlast på bjelken

Som avslutning på sjekkingen og innstillingene gikk vi gjennom 'Analysis' for å starte analysen. Etter at vi trykket på 'Start'-knappen, dukket 'Analysis'-fanen opp (Figur 47). Der bestemte vi at analysen skulle opprette et nettverk, at lastene skulle leses og tolkes, og at vi trengte ulike lasttilfeller. Vi bestemte også hvilken type last som skulle tolkes som egenlast for bjelken under analysen. Lasten er definert i Revit, men her måtte vi forklare for SOFiSTiK at vi har definert en egenlast med navn.

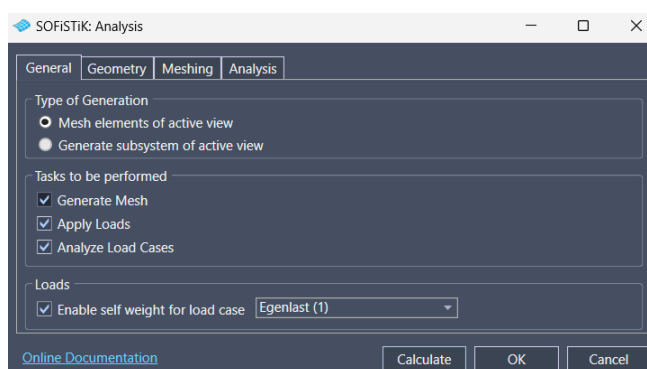
Ved å trykke på 'Calculate'-knappen (Figur 45) bekreftet vi at analysen gikk bra, resultatrapporten var klar til å leses, og bjelken var forberedt for videre arbeid, som i dette tilfellet var design. Vi krysset av for 'Open output file after closing' slik at vi kunne gjennomgå rapporten. Selv om analyseresultatene ikke er det viktigste i dette tilfellet, sjekket vi dem likevel før vi fortsatte med designarbeidet.



Figur 45: Her ser vi at analysen var suksessfullt



Figur 47: Start knappen for analysen

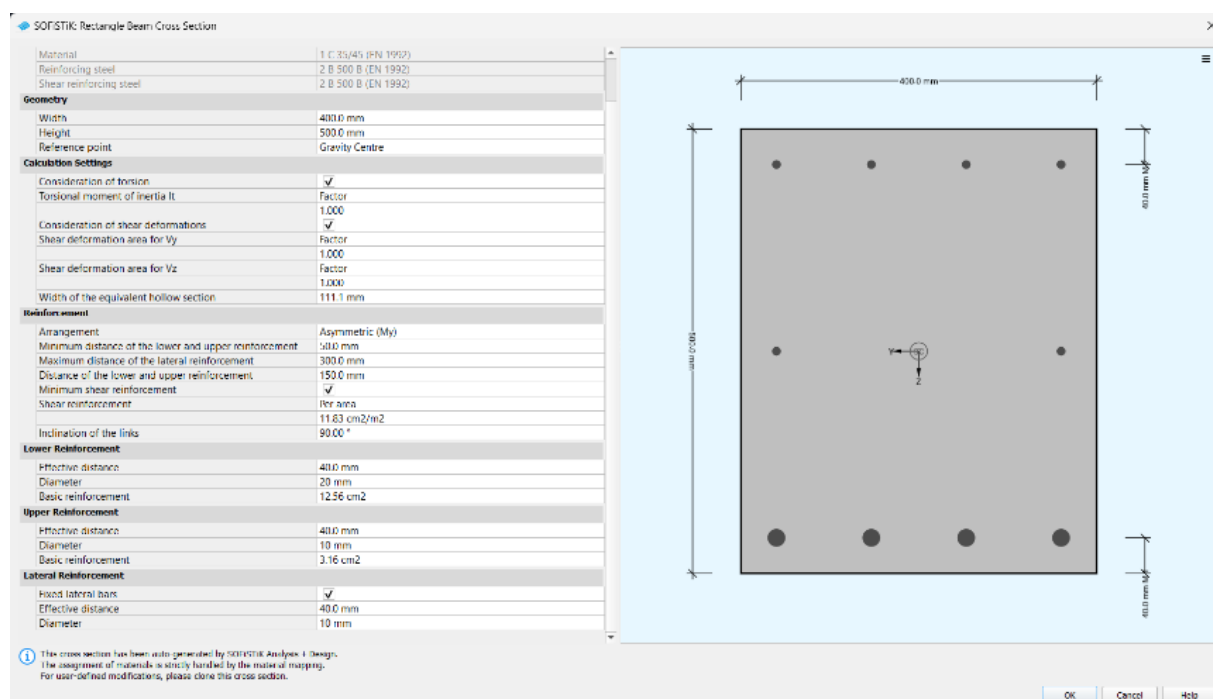


Figur 47: Valg av det nødvendige faktorer som vi forventer for at SOFiSTiK skal forstå

Vi gikk gjennom rapporten og sjekket om det nødvendige for designprosessen var korrekt i henhold til kravene i NS – EC2. Rapporten er omfattende og avansert, strekker seg over 9 sider og inneholder detaljerte analyseresultater i form av tabeller og grafer. Rapporten er vedlagt (Vedlegg A). Som nevnt er ikke bruk av analysen i denne oppgaven en del av målsettingen. Derfor er det ikke nødvendig for oss å forklare innholdet.

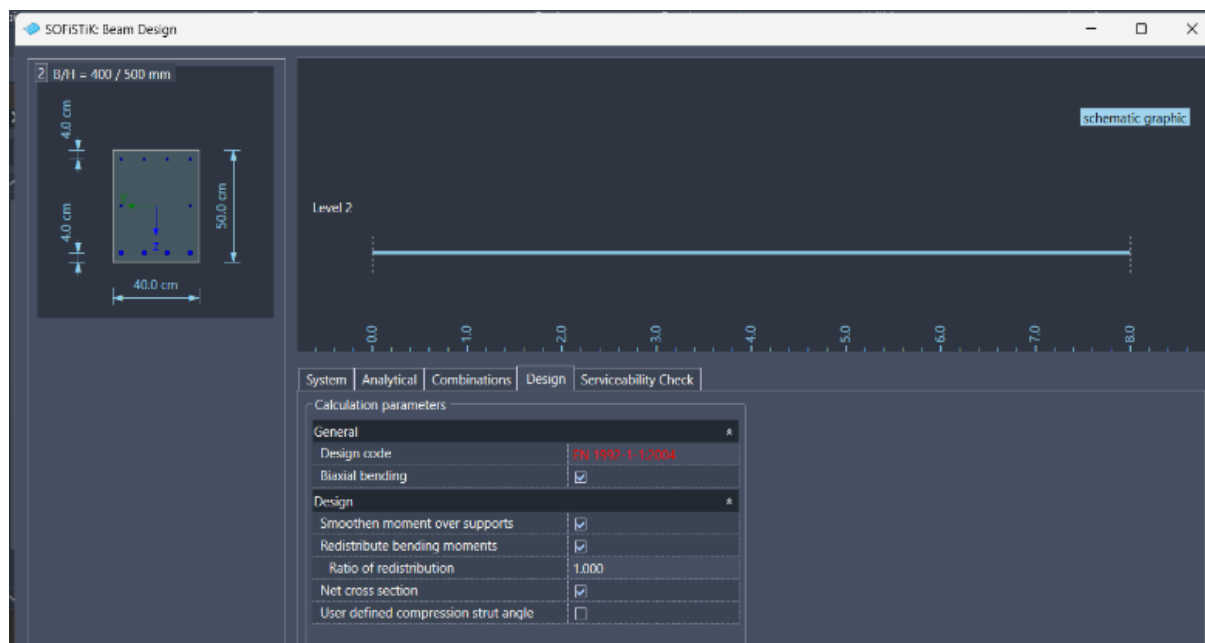
3.4.2.2 Dimensjonering av bjelken for armering

Etter at analysen var utført og resultatet var klart for videre bruk, tok vi for oss designprosessen for armering. Vi brukte designverktøyet for bjelker, som ble forklart i kapittel 2.6.6, til å designe



Figur 49: arrangering av armering før designprosessen.

armeringen av bjelken. Armeringen var bestemt på forhånd, men verktøyet ga mulighet til å endre hvilke armeringsoppsett som skulle brukes. Designverktøyets arbeid var nå enten å vise oss om den forhåndsbestemte armeringen var for liten eller for stor, eller om den var

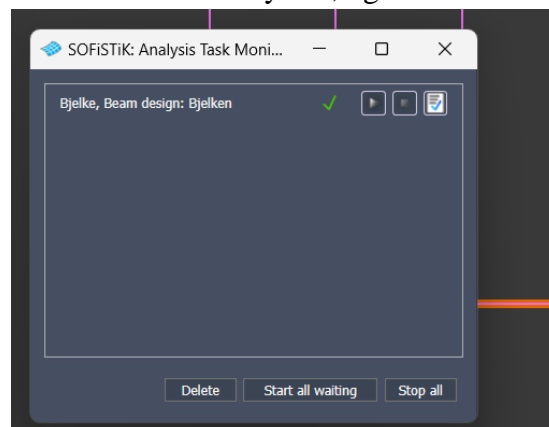


Figur 48: Bjelkes designkonfigurasjon.

tilstrekkelig basert på analysen. Bildet nedenfor (Figur 49) viser hva vi hadde forhåndsbestemt/arrangerte for armeringen.

Vi benyttet bjelkedesignverktøyet, som ble forklart i kapittel 2.6.6.2, til designarmering, og denne fanen dukket opp (**Feil! Fant ikke referanseilden.**). Den ga oss mulighet for detaljinnstilling av ulike faktorer som påvirker designresultatet. Vi valgte at designresultatet skulle være «utvidet», slik at alle lastkombinasjoner ville bli vurdert under designprosessen, og at biaxial bøyning og redistribusjon av bøyemomentet ville bli tatt hensyn til, og at EC2 skulle brukes som designkode. I tillegg ga vi beskjed til verktøyet om at faktorer som gjelder bruksgrensetilstand vil bli tatt hensyn til i høyeste grad.

Etter at vi trykket på Calculate-knappen, fikk vi designresultatene fra Analysis Task Monitor(Figur 50). Ved å klikke på dokumentikonet, ble vi ført til hele dokumentet med resultatene. På første side av dokumentet



Figur 50:Analysis Task Monitor etter design

oppdaget vi at den norske standarden for EC2 ikke ble brukt som ønsket (Figur 51). I stedet var

Position: Bjelken

Design Code: EuroNorm: NS EN 1992-1-1:2004 (NA:2021) Design of concrete structures
 +++++ warning no. 21 in program The specific design code is not supported.
 The specific design code is not supported.
 The calculation will be processed using design code EuroNorm EN 1992-1-1:2004.

Figur 51:Advarsel vi fikk at NS-EC2 ikke ble benyttet for designgrunnlag

det den generelle EC2-standard som ble brukt i designen.

Formålet med bjelkens analyse- og designprosess var å teste påliteligheten til SOFiSTiK-programvaren. Ved hjelp av kontrollerte håndberegninger sjekket vi om programvarens resultater var fornuftige og brukbare. Fra dette lærer vi hvordan programvaren fungerer i praksis. Resultatene fra programvaren og håndberegningene var svært like.

3.4.2.3 Håndberegning

Vi benyttet Mathcad Prime dataprogram (Figur 52) for beregning av hele håndberegningsprosessen for bjelkens nødvendige armering (Se vedlegg A5). Vi fikk fra håndberegningen at: nødvendig armering for strekkside = 4132 mm^2 .

Nødvendig armering	
strekkside:	$A_s := A_{s1} + A_{s2} \rightarrow 4132.6977124958004783 \cdot \text{mm}^2$
trykkside:	$A'_s := A_{s2} \rightarrow 1368.3823432343234324 \cdot \text{mm}^2$
Skjæramering :	$\frac{A_{sw}}{s} \geq 0.691 \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$

Figur 52: Resultat av nødvendig armering ved bruk av håndberegning.

Nødvendig armering fra SOFiSTiK verktøyet (vedlegg A) fikk vi at:

$$\text{Strekkside: } 4132 \text{ mm}^2$$

$$\text{Trykkside: } 1211 \text{ mm}^2$$

$$\text{Skjæramering: } 0.74 \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

Tabell 4: Armerings resultater fra verktøyet og håndberegning

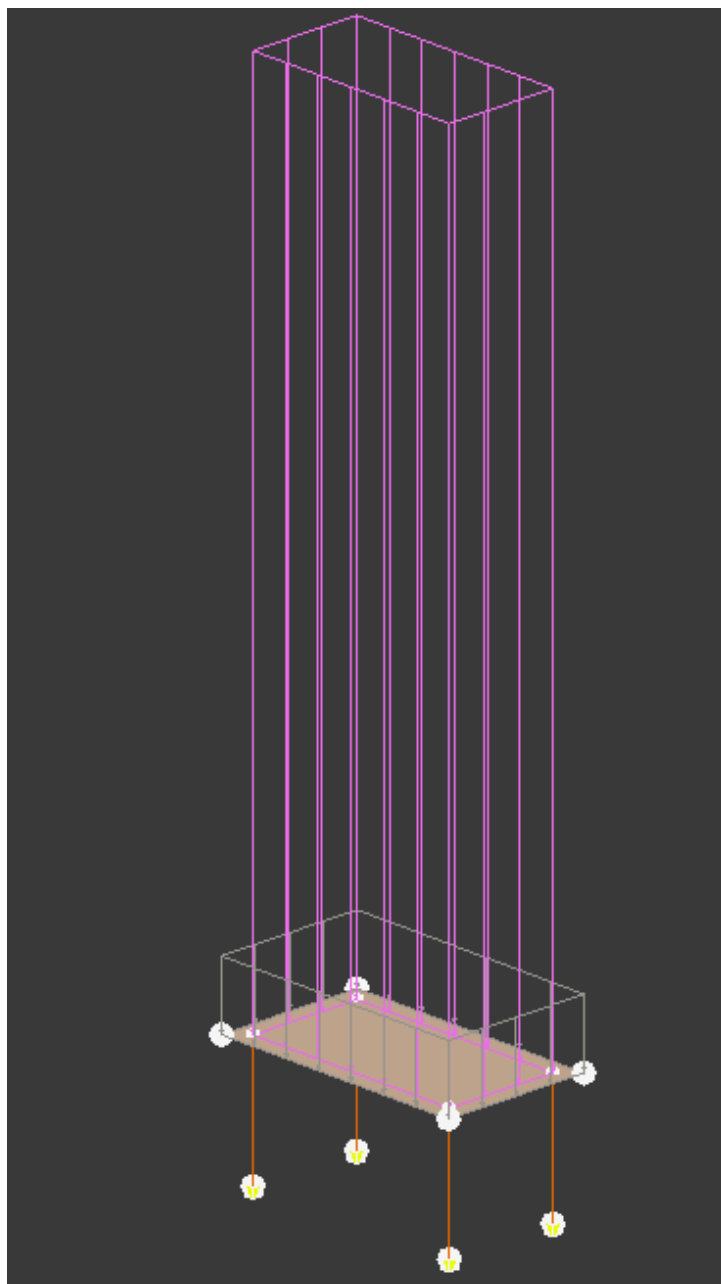
Nødvendig armering for:	Håndberegningsresultat	SOFiSTiK-resultat
Strekkside	4133 mm^2	4132 mm^2
Trykkside	1368 mm^2	1211 mm^2
Skjæramering	$0.691 \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$	$0.740 \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$

Nødvendig armeringsresultat som vises her (Tabell 4), er kun basert på de største bøyemoment og største skjærkrefter som oppstår på bjelken. For detalj informasjon om nødvendig armering langs på bjelken bør man se det detaljerte innholdet av SOFiSTiK verktøyet designresultat. Det er tydeligvis noen forskjeller mellom resultatene for trykksiden og skjærameringen, men de er ikke store nok til at man trenger å bekymre seg. Likevel vil vi diskutere dem i diskusjonsdelen av oppgaven.

3.4.3 Basis modulær enhet

Fremgangsmåten for analyse og design av basis modulær enhet, som ble introdusert i kapittel 3.5.1, vil bli beskrevet i detalj her. Geometriske data for selve konstruksjonen og tverrsnittene er beskrevet i kapittel 3.5.1 og i Tabell 3. Videre vil det bli klargjort hva som inngår i denne fremgangsmåten. Prosedyren for denne delen starter etter at den analytiske modellen for den basiske modulære enheten er ferdigstilt, grensebetingelsene er bestemt, og lastene er definert og lagt på modellen.

I denne fremgangsmåten for den modulære enheten fokuserer vi kun på designtrinnene som omhandler søyler og takplater. Modellering av enheten, forberedelse og generering av analytiske modeller (Figur 53), samt designtrinnene for bjelker, er de samme som ble brukt for fritt opplagte bjelken. Likevel vil både analyse- og designresultatene for



Figur 53: Enheten vist i analytisk modellform med pålagte laster

bjelkene bli diskutert i oppgavens resultater og drøftelsesdeler, og detaljene vil følges opp i vedlegget.

3.4.3.1 Design prosedyre av de ulike deler av basis modulær enheten

Analyse av modellen ble gjort ved bruk av stegene som ble beskrevet i kap.2.6.5. Analysen gikk bra, og de ulike delene av modellen var nå klar for designarmering. Analyserapporten

(vedlegg A0) gir detalj informasjon av analysen, blant annet Nasjonalt Definert Parametere i henhold til EC2, materialer og sine egenskaper, osv (Figur 54).

National Defined Parameters	
Reference of parameter in design code	Value
long term reduction concrete compressive strength α -cc EN 1992-1-1 3.1.6 (1)	1.000 ¹
long term reduction concrete tensile strength α -ct EN 1992-1-1 3.1.6 (2)	1.000 ¹
safety coefficient γ -c for concrete EN 1992-1-1 2.4.2.4	1.500 ¹
safety coefficient γ -CE for concrete elasticity EN 1992-1-1 5.8.6 (3)	1.200 ¹
safety coefficient γ -s for reinforcing steel EN 1992-1-1 2.4.2.4	1.150 ¹
¹ national defined parameter taken from the INI-files	

Materials	
Mat	Classification
1	C 35/45 (EN 1992)
2	B 500 B (EN 1992)

Mat 1 C 35/45 (EN 1992)						
Young's modulus	E	34077	[MPa]	Safetyfactor	1.50	[-]
Poisson's ratio	μ	0.20	[-]	Strength ¹	fc	35.00 [MPa]
Shear modulus	G	14199	[MPa]	Nominal strength	fck	35.00 [MPa]
Compression modulus	K	18932	[MPa]	Tensile strength	fctm	3.21 [MPa]
Nominal Weight	γ	25.0	[kN/m ³]	Tensile strength	fctk,05	2.25 [MPa]
Mean density	ρ	2400.0	[kg/m ³]	Tensile strength	fctk,95	4.17 [MPa]
Elongation coefficient	α	1.00E-05	[1/K]	Bond strength	fbd	3.37 [MPa]
				Service strength	fcm	43.00 [MPa]
				Fatigue strength	fcd,fat	17.06 [MPa]
				Tensile strength	fctd	1.50 [MPa]
				Tensile failure energy	Gf	0.14 [N/mm]
¹ fc = fck * α -cc						

Figur 54: Eksempelvis av analyseresultats innhold.

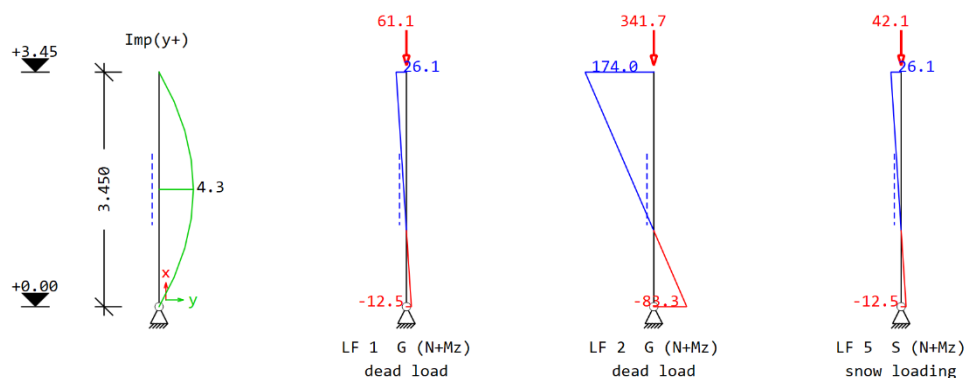
3.4.3.2 Design av søylearmering

Vi startet med søylearmering ved bruk Column Design-verktøyet. Siden modellen hadde kun en etasje og søylene var i samme retning og hadde samme strukturell betingelse trengte vi ikke å designe dem ett for ett. Vi brukte prosedyre som ble beskrevet i kapittel 2.6.6.1 for design av søylene. Designresultat (vedlegg A1) av søylene viste at vi hadde ingen advarsel gjennom designprosessen. Resultatet viste også i detalj hva som ble brukt som beregningsgrunnlag for den endelige armerings resultat.

I resultatrapporten ble det vist at det var metode EN 1992-1-1, 5.8.8 som ble brukt for designgrunnlag av de endelige armeringsresultatene. Denne metoden er i hovedsak egnet for enkeltstående konstruksjonsdeler med konstant normalkraft og en kjent effektiv lengde l_0 . Metoden gir et nominelt andre ordens moment basert på en forskyvning, som igjen er basert på den effektive lengden og en anslått største krumning (EC2, kap. 5.8.8). Vi bruker denne metoden når vi har konstruksjonsdeler som påkjennes av bøyemoment i begge retninger. Ved praktisk dimensjonering av en konstruksjonsdel som påvirkes av moment og aksialkraft, slik som søylene vi bruker for den modulære enheten, tar vi hensyn til dimensjoneringsavhengigheter av betongens tverrsnitt, armeringens tverrsnitt og plassering, samt materialkvaliteten (Sørensen, 2013). Dette arbeidet er svært komplisert og for avansert for

håndberegning. Derfor bruker man et tilnærmet M-N-diagram som en forenklingsmetode når håndberegning må brukes for slike komplekse konstruksjoner.

Designrapporten viste de karakteristiske lastene og deres påvirkning på bjelken i henhold til metoden EN 1992-1-1, kapittel 5.8.8, som gjelder for en konstruksjonsdel som påkjennes av moment og aksialkraft samtidig, i grafisk form (Figur 55).



Figur 55: Grafisk visning av søylene som påkjent av moment og aksialkraft samtidig

Fra designrapporten så vi hvilken lastkombinasjon som var avgjørende, og tilhørende verdier av dimensjonerende krefter (Figur 56).

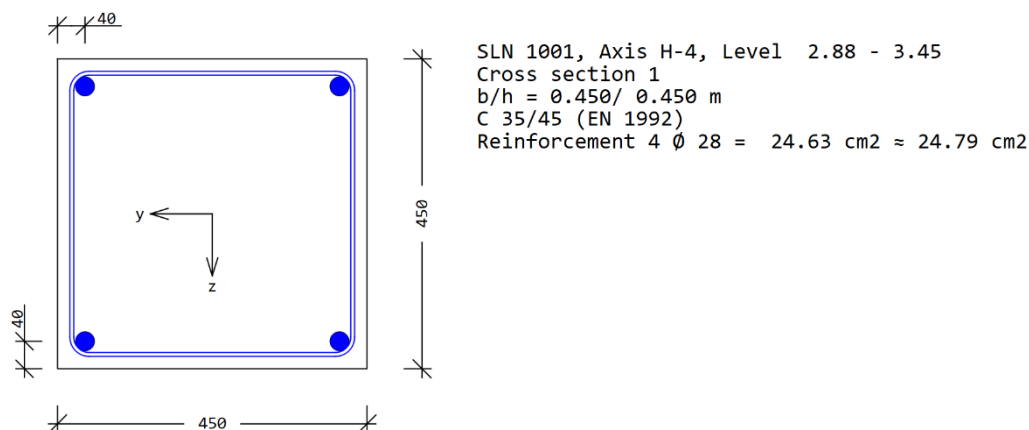
Analysed combinations

Act	Type	Combination
1001	(D)	1.35G(1+2)+1.5S(5)
1002	(D)	G(1+2)
1003	(D)	G(1+2)+1.5S(5)
1004	(D)	1.35G(1+2)
1005	(D)	1.35G(1+2)+0.75S(5)
1006	(D)	G(1+2)+0.75S(5)
1007	(D)	1.1475G(1+2)+1.5S(5)
1008	(D)	1.1475G(1+2)

Combined Forces

SLN	Axis	Act	Type	Level [m]	N [kN]	My [kNm]	Mz [kNm]	Title
1001	H-4	1001	(D)	3.450	-606.5	-64.81	-309.25	1.35G(1+2)+1.5S(5)
	Level 3			0.000		31.10	148.00	

Figur 56: I øverste tabell ser vi hvilken lastkombinasjon som var avgjørende og i den andre tabell ser vi de tilhørende dimensjonerende laster. Tabellene er fra designresultat av søylen.



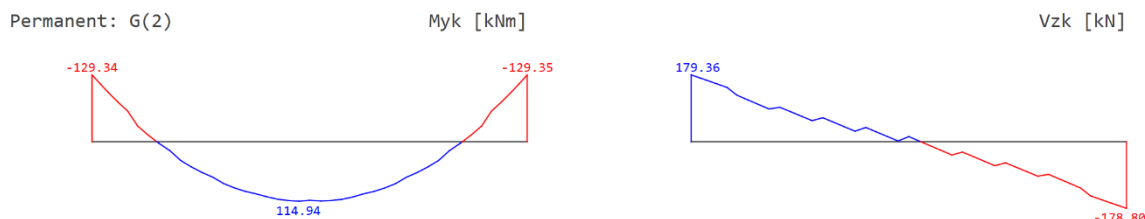
Figur 57: foreslått nødvendig armering av søylene for modulærenhet fra SOFiSTiK.

På slutten av rapporten fikk vi hva som ble foreslått som nødvendig armering (Figur 57) for bjelken og plassering av armeringene. Vi så nødvendig armering for søylene er 2479 mm^2 , og verktøyet optimaliserte til 2463 mm^2 , som er akseptabel. Programvaren ga ikke resultat for skjærarmeringen for søylen.

3.4.3.3 Design av bjelkearmering

Proseduren for design av armering for en bjelke er beskrevet i detalj i prosedyren for en fritt opplagt bjelke og i kapittel 2.6.6.2. Den eneste forskjellen her er at vi må bruke prosedyren fire ganger, siden vi har fire bjelker som ikke er i samme rekke. Her beskriver vi kun resultatene, som i seg selv er detaljert og avansert forklart i vedlegg A3, med illustrasjoner og forklaringer.

Vi kan oppsummere innholdet som strekker over 12 sider (for en bjelke) av designresultat slik: Rapporten gir en detaljert analyse av bjelken i henhold til EC2. Den starter med en oversikt over designnormer og materialspesifikasjoner som benyttes, inkludert betong- og stålkvaliteter. Den viser at materialer som vi valgte var betong C 35/45 og stål B 500 B. Videre viser det en grundig analyse av de karakteristiske kreftene som påvirker bjelken, med spesifikke detaljer for ulike lasttilfeller, inkludert egenvekt, snølast, og deres kombinasjoner. Innholdet presenteres i detaljerte tabeller og diagrammer som viser spenn, aksiale krefter, bøyemomenter, og støttemomenter, samt nødvendig forsterkningsdesign. Vi kan se at disse illustrasjonene (Figur 58 & Figur 60) og beregningene gir en klar visualisering av hvordan kreftene distribueres og hvordan spenninger og deformasjoner oppstår under både permanente og variable laster.



Figur 58: Grafisk visning av bjelken fra resultatrapporten under de belastende karakteriske momenter og skjærkrefter

Grundig analyse av spesifikke lasttilfeller, inkludert kombinasjoner av egenvekt, permanentlast og snølast, presenteres i resultatrapporten. Resultatene av disse analysene er lagt frem i tabellform og gir et detaljert innblikk i de interne kreftene og momentene langs bjelken. Fra tabellene ser vi at programvaren skiller tydelig mellom karakteristiske krefter og dimensjonerende krefter. For eksempel bruker programvaren ' M_{yk} ' for beregning av moment i de karakteristiske kreftene, mens ' M_{yEd} ' brukes for de dimensjonerende momentene (Figur 59), og tilsvarende skille gjøres for skjærkreftene.

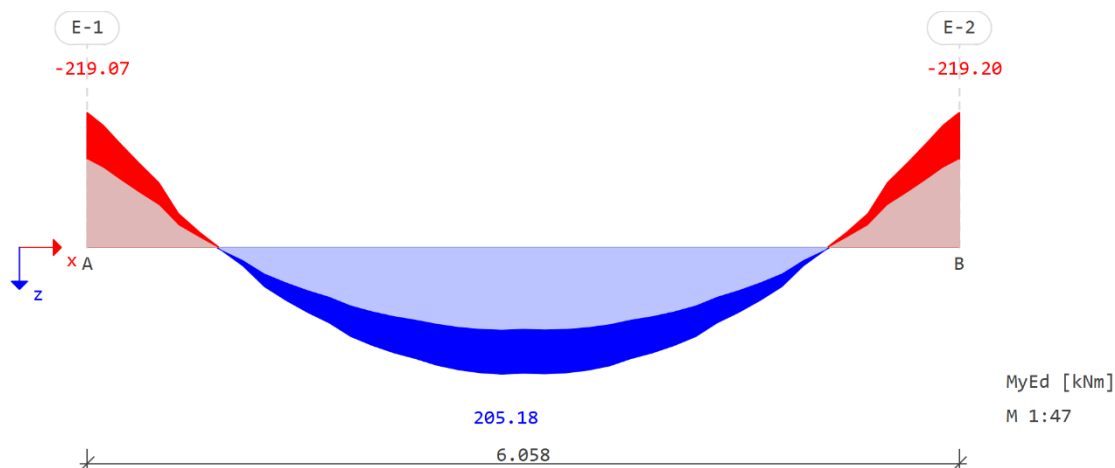
Load case 1010 (D) : 1.35G(1+2)+0.75S(5)

Span	Axis	x[m]	NEd[kN]	MyEd[kNm]	MzEd[kNm]	VzEd[kN]	VyEd[kN]
		2.730	-37.1	189.99	0.04	24.0	-0.0
		2.880	-37.1	192.00	0.04	7.0	-0.0
		3.029	-37.0	190.37	0.04	15.7	0.0
		3.179	-37.1	191.52	0.04	-1.7	0.0
		3.329	-37.1	190.08	0.04	-19.0	0.0
		3.478	-37.1	186.04	0.03	-36.4	0.0
		3.628	-37.2	179.41	0.03	-53.7	0.0
		3.777	-38.1	168.44	0.03	-51.3	0.0

Figur 59: Dette bildet er et eksempel på hvordan tabellen presenteres i rapporten med de dimensjonerende krefter langs bjelkespennet.

Rapporten viser også hvordan sikkerhets- og kombinasjonskoeffisienter anvendes under forskjellige lastscenarier for å sikre at bjelken overholder alle relevante sikkerhetskrav.

Vi observerer bjelkens respons under de kombinerte ulike lasttilfeller med hensyn til ULS og SLS grensetilstander. Dette inkluderer langtidsvirkninger som krypeffekter og deformasjoner over tid. Presentasjonen av disse dataene er separat gjennom rapporten, og det er tydelig at både analyse- og designresultatene tilfredsstillt kravene for henholdsvis ULS og SLS.



Figur 60: Grafisk visning av bjelken fra resultatrapporten under de belastende dimensjonerende momenter

Fra resultatrapporten så vi hvilke kapitler av EC2 som ble brukt for armeringsdesign for både lengde- og skjærarmering. Vi så at:

Kapittel 6 av EC2 ble brukt for armerings beregning for ULS, og kapittel 7 og flere seksjoner og tabeller av kapitlet for SLS, som er kryp, opprissing og deformasjoner. Kapittel 5 for effektiv spennvidde av bjelkene. Fra rapporten ser vi at nødvendig armering for bjelken øker etter beregning av SLS, noe som var mindre i forhold til ULS beregningen.

3.4.3.4 Design av takplatearmering

Vi har utført designarmering for takplaten i henhold til brukermanualen, uten å endre på verktøyets innstillinger. Som nevnt i kapittel 2.6.6.3, er vårt kompetansenivå begrenset til forsvarlig beregning av armering for en takplate, men å utføre design av takplaten var viktig for oss for å vurdere hvor fullstendig SOFiSTiK-verktøyet er for en hel konstruksjon. Derfor er vår rolle her kun å observere armeringsresultatene for takplaten, uten å foreta en dypere vurdering av deres nøyaktighet.

Etter at vi hadde brukt manualens framgangsmåte, fikk vi designresultatene fra SOFiSTiK Analysis Task Monitor, som beskrevet i kapittel 2.6.6. Vi gjennomgikk innholdet i rapporten grundig. Rapporten (vedlegg A2) om designresultatene strekker seg over 255 sider og inneholder tabeller og grafer som viser detaljert analyse og armeringsdesign av takplaten.

Ultimate Limit State (ULS) Combinations - Automatic Definition

Analysis results of individual load cases have been combined for each Finite Element using MAXIMA, following the combination rule for the Ultimate Limit State according to Eq. (6.10) of Eurocode EN1990. Resulting forces and stresses represent envelopes, not a singular load combination, for each Finite Element and will be used for the design.

The following partial safety factors and combination coefficients were used:

Actions

type	part	sup	Designation	γ -u	γ -f	γ -a	ψ_0	ψ_1	ψ_2	ψ_{1inf}
G	G	perm	dead load	1.35	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Q	Q	cond	variable load	1.50	0.00	1.00	0.70	0.50	0.30	1.00
S	Q	cond	snow loading	1.50	0.00	1.00	0.50	0.20	0.00	0.20
W	Q	excl	wind loading	1.50	0.00	1.00	0.60	0.20	0.00	1.00
Reliability factor				Kfi	1.000					
Reduction factor				xsi	0.850					
type	action	γ -u, γ -f, γ -a		partial safety factors for unfavourable/favourable/accidental						
part	partition of the action	ψ_0 , ψ_1 , ψ_2 , ψ_{1inf}		combination coefficients						
sup	superposition type									

Figur 61: Skjermbildet viser et eksempel på hvordan designresultatene for takplaten formidles. Rapporten viser tydelig at analysen som ble brukt for armeringsdesignet er i samsvar med EC2 ULS.

Fra rapporten kunne vi se at programvarens beregning for armering baseres på både ULS (Figur 61) og SLS av EC2 retningslinjene for dimensjonering.

Detaljert arrangering av armering, inkludert spesifikasjoner om overdekning og plassering er nevnt på en tabell under overskriften "Design Parameters - Tables". Her angis parametere som overdekning til armeringsstengene, diameter, og minimumsforsterkning nødvendig for å kontrollere rissvidde. Informasjonen inkluderes om spesifikasjoner for overkant og underkant armeringslag, inkludert relevante avstander og armeringsdiametere (Figur 62).

Design Parameters - Tables

Reinforcementparameter two layer reinforcement

Selection Grp elem no. no.	distance		bar-diameter		crackwidth		steelstress		min.reinf.	
	d1-u [mm]	2.lay 45.0 [mm]	ds-u [mm]	2.lay 10 [mm]	wk-u [mm]	2.lay - [mm]	sigsu [MPa]	2.lay - [MPa]	asu [cm2/m]	2.lay 0.79 [cm2/m]
default	35.0	45.0	10	10	-	-	-	-	0.79	0.79
	35.0	45.0	10	10	-	-	-	-	1.13	1.13
GAR 1001	30.0	40.0	10	10	0.40	0.40	0.00	0.00	-	-
	30.0	40.0	10	10	0.40	0.40	0.00	0.00	-	-
distance	upper / lower distance center of bar to surface									
bar-diameter	upper / lower bar diameter									
crackwidth	upper / lower required crack width									
steelstress	upper / lower maximum steel stress in SLS check									
min.reinf.	upper / lower minimum reinforcement									

The reinforcement directions relate to the local coordinate system of the elements and have to be plotted graphically.

With the input of a steel stress sigsu... the 'crack design according tables' uses this given stress sigsu for the corresponding layer. With this input, the check can be done for bar distances instead of bar diameters, see legend SLS control parameters.

Figur 62: Skjermbildet viser et eksempel på hvordan armeringsdesignresultatene for takplaten arrangeres.

Mengde og plassering av total nødvendig armering for takplaten strekker seg over 25 sider med tabell navn "Required Reinforcements acc. to EuroNorm: EN 1992-1-1:2004 Design of concrete structures" (Figur 63).

Required Reinforcements acc. to EuroNorm: EN 1992-1-1:2004 Design of concrete structures

Grp	Element	LC	t [m]	asu [cm ² /m]	asu2 [cm ² /m]	asu3 [cm ² /m]	asl [cm ² /m]	asl2 [cm ² /m]	asl3 [cm ² /m]	supp [-]	shear [-]	ass [cm ² /m ²]
Ø	81	2109	0.200				5.99	1.53			1	
		2110	0.200				6.90	1.83			1	
		2111	0.200				4.95	1.31			1	
		2112	0.200				7.97	2.05			1	
		2113	0.200				4.95	1.31			1	
		2114	0.200				7.97	2.05			1	
		2115	0.200				4.95	1.31			1	
		2116	0.200				7.97	2.05			1	
		max.	0.200				7.97	2.05			1	

Grp primary group number
 Element element number
 LC load case
 t plate thickness
 asu Principal reinforcements (1st layer) Top
 asu2 Cross reinforcements (2nd layer) Top
 asu3 Third reinforcements
 asl Principal reinforcements (1st layer) Bottom
 asl2 Cross reinforcements (2nd layer) Bottom
 asl3 Third reinforcements
 supp reduction factor for the shear force near supports, punc=point in punching zone -> punching shear design
 shear shear zone: 1=0k, punc=punching area, 1s=asu/l increased for shear, 1d=for punching, 2=required ass, 2m=minimum shear reinf., 3=
 ass Shear reinforcement

Figur 63: Skjermbildet viser et eksempel på hvordan armeringsdesignresultatene for takplaten formidles.

Under flere tilfeller får vi også en detaljert ordforklaring fra programvaren med i designresultatrapporten (Figur 64 & Figur 64). Fra tekstene kan vi se hva som ble gjort og hvorfor det ble gjort.

Reduction of concrete compression strength in case of transvers tension = 25.0 [o/o]

Material-safety-factors:

MAT	concr SC1	SC2	steel SS1	SS2
1	1.50	1.50		
2			1.15	1.15

MAT material number
 concr SC1 material safety SC1/SC2 = bending/compression
 steel SS1 material safety steel bending/compression

At direct supports the shear force is linearly reduced from $1.0 \cdot d$ up to the face of the support to 70%.

The maximum shear capacity is checked at the face of the support without reduction.

For punching design, the longitudinal reinforcement will be increased up to 1.50% to avoid shear reinforcement.

Outside the punching area, the normal slab shear design may increase the longitudinal reinforcement up to 0.20%.

The reinforcement directions relate to the local coordinate system of the elements and have to be plotted graphically.

The design takes a uniform element thickness of 0.200 [m].

Over columns a greater element height is taken into account

The reinforcement is saved in the data base as reinforcement distribution number 1

Figur 64: Skjermbildet viser et eksempel på hvordan vi får ordforklaringen fra programvaren med i designresultatrapporten.

Vi leser også advarsel og andre relevante forklaringer fra designresultatrapporten.

A robustness minimum reinforcement has not been requested and has to be checked separately.

A minimum reinforcement has not been requested and has to be checked separately.

The reinforcement directions relate to the local coordinate system of the elements and have to be plotted graphically.

The design takes a uniform element thickness of 0.200 [m].

Over columns a greater element height is taken into account

Punching design values were taken from reinforcement distribution no. 1

Serviceability limit state control parameters

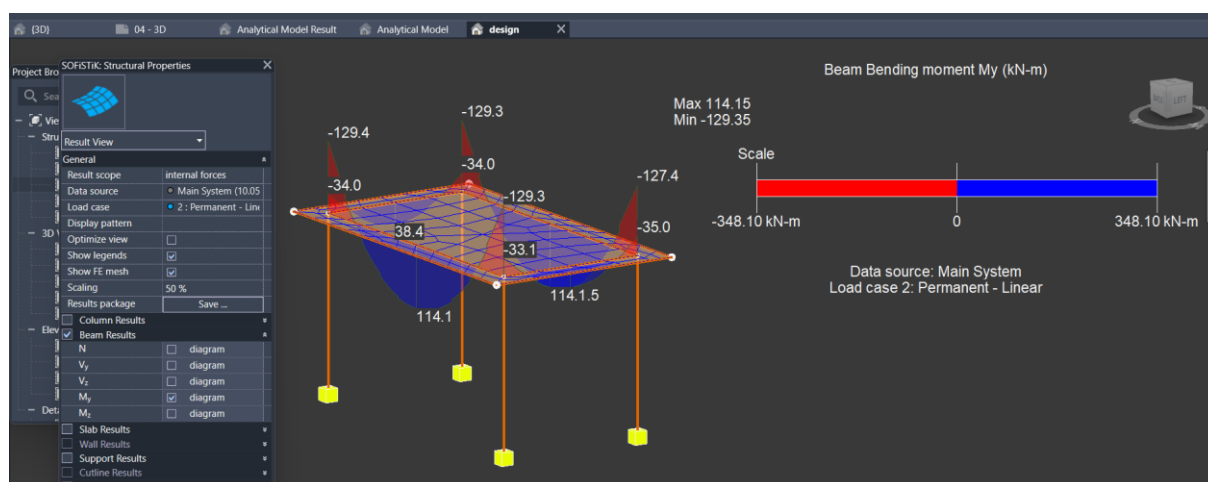
No	Code	dNW [mm]	
1	EN-1992	->para	diameter check acc. EN 1992 7.3.3 ¹
Reinforcement has been increased by SLS design -> WINGRAF: Decisive design check✓			
¹ with national annex			

Figur 65: Skjermbildet viser et eksempel på hvordan vi får relevante forklaringen, advarsel og informasjon om økningen av armeringen fra ULS til SLS.

3.4.3.5 Visualisering av resultatene og plassering av armering på modellen

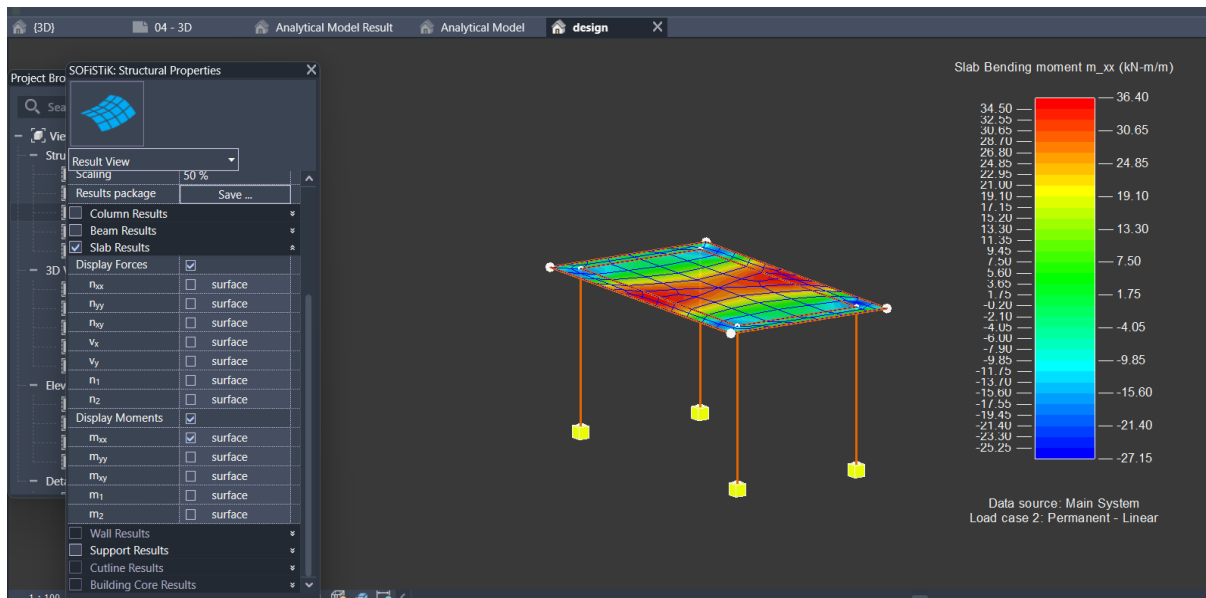
Visualisering av resultatene skjer etter at man er ferdig med modellens analysering og designing for armering. Etter at vi var ferdig med analysering og designing for armering av basis modulær enhet, og gjennomgikk over de resultatrapportene, brukte vi SOFiSTiK visualiserings verktøy til å se analyse- og designresultatene i en 3D-modell av konstruksjonen.

Visualiseringsverktøyet gir en komplett fremstilling av de interne kreftene som påvirker hele konstruksjonen. Dette gjøres ved å vise kreftene i de ulike konstruksjonsdelene i en 3D-modell, med numeriske verdier og dynamiske 3D-grafer som indikerer størrelsen på kreftene ved forskjellige punkter av konstruksjonsdelene. Dette ser vi tydelig på bjelker (Figur 66) og søyler.



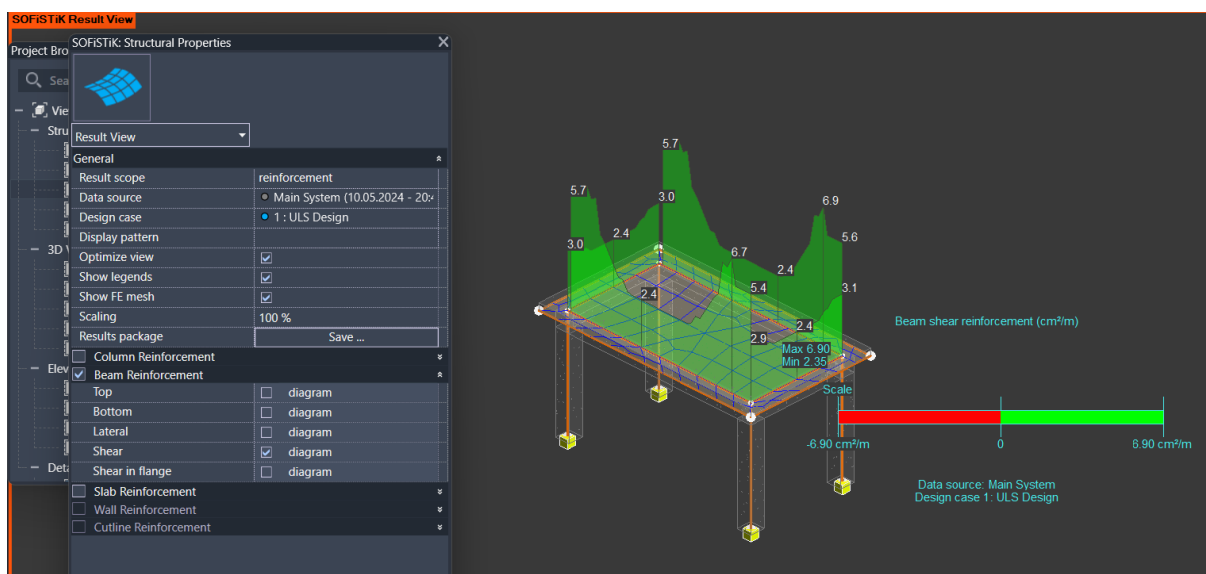
Figur 66: Momentfordelingen på bjelkene på grunn av permanentlast

I tillegg viser visualiseringsverktøyet med fargekoder som viser intensitetsnivået på de konstruksjonsdelene som er vanskelig å se; dynamiske 3D-grafer eller numeriske verdier kan være uklare. For eksempel på en takplate (Figur 67) som er bred og har stort areal, men som ikke er tykk; her kunne vi se intensitetsnivåer med fargekodene som endrer seg gradvis.

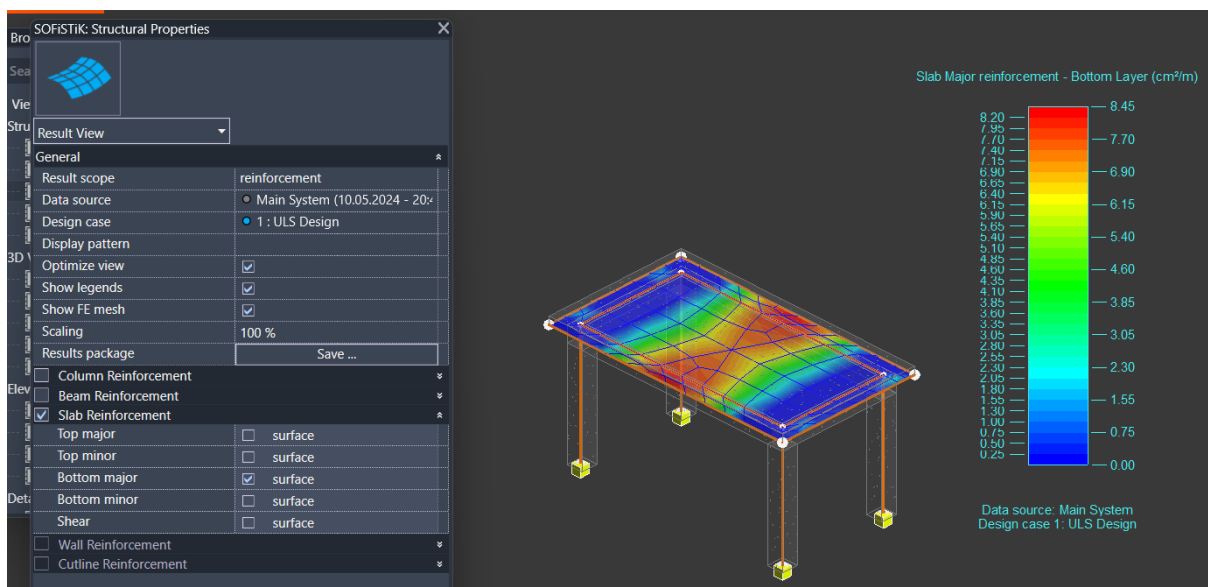


Figur 67: Fargekode og tallverdi basert visualisering av momenter på takplaten

Gjennom dette verktøyet kunne vi observere også armeringsresultatene, som visualiseres ved hjelp av en detaljert 3D-graf på modellens konstruksjonsdel, noe som gir en klar og umiddelbar forståelse av armeringsfordelingen (Figur 68) i hele strukturen. Dette hjelper også til med å sammenligne armeringsresultatene med de kreftene som påkjennes konstruksjonen, og gir en intuitiv forståelse og bekreftelse på at armeringen er tilstrekkelig for å motstå disse belastningene (Figur 69).



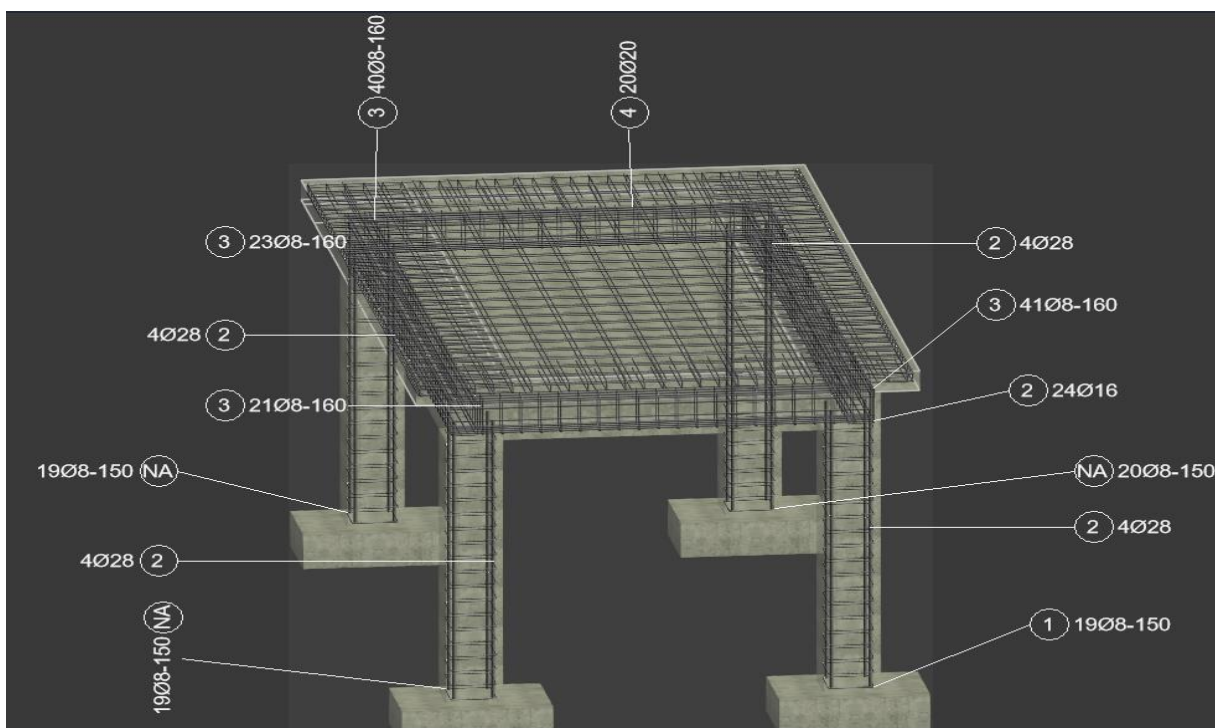
Figur 68: Fordeling av Skjærarmering på bjelkene



Figur 69: Fordeling av armeringen i underkant av takplaten

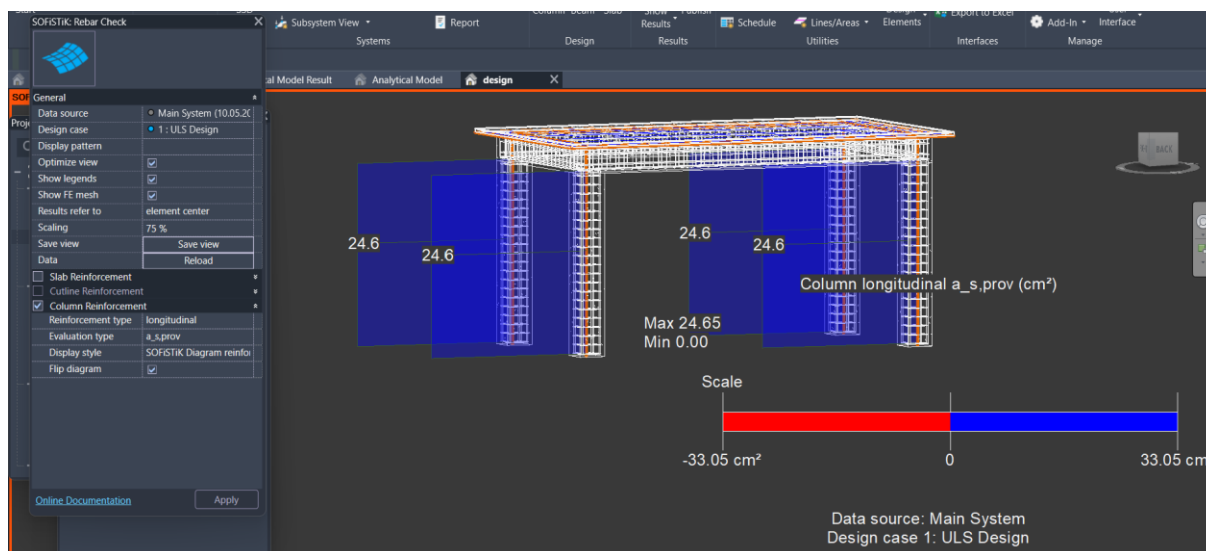
3.4.3.6 Plassering av armering på modellen

Etter at vi fant ut hva de nødvendige armeringene for basis modulære enheten fra SOFiSTiK er, siktet vi mot å plassere armeringen på modellen. Vi utførte en liten håndberegning for å fastslå tallverdiene for de nødvendige armeringene med arealverdi. Deretter armerte vi den modulære enheten ved bruk av Revits verktøy for armering og SOFiSTiK Reinforcement (Figur 70).

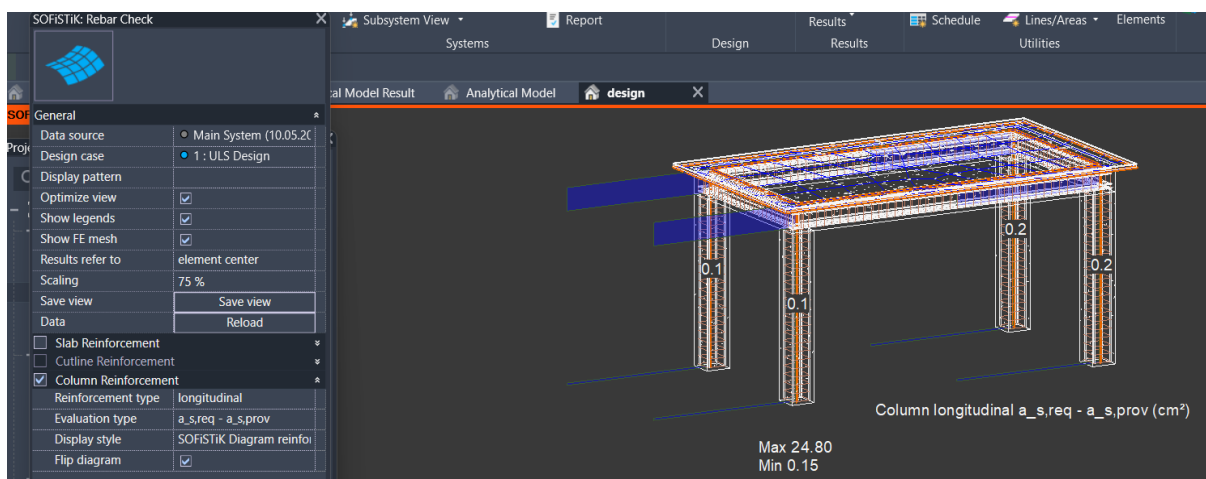


Figur 70: Armering og detaljering av armeringen ble gjort ved bruk av Revit og SOFiSTiK Reinforcement

Målet med å armere den modulære enheten er tofoldig: For det første å teste SOFiSTiKs Rebar Checker for å vurdere dens funksjonalitet i praksis, og for det andre å undersøke om SOFiSTiK Reinforcement kan effektivisere 3D-armeringsprosesser i betongkonstruksjoner, som et svar på ett av oppgavens mål om å utforske Revits rolle i slike prosesser. Som nevnt i kapittel 2.9, vil sistnevnte ikke utføres i bred detalj og dybde, men kun ment for å antyde at det finnes muligheter som kan utforskes videre.



Figur 71: Verktøyet viser levert armeringene på modellen.



Figur 72: Verktøyet viser levert armeringen minus designet armeringen

Etter at vi var ferdig med å armere modellen ved bruk av Revit og SOFiSTiKs verktøyer for armering, gikk vi videre til å teste hvordan verktøyet SOFiSTiKs armeringssjekker virker (Figur 71 & Figur 72). Verktøyet er designet for å sjekke den levert armeringen på modellen basert på det forhåndsdesignede resultatet, kun for søyler og plater, som inkluderer takplater og gulvplater, i henhold til SOFiSTiK (SOFiSTiK, 2024). Vi testet verktøyet både på de armerte søylene og takplaten. Det fungerte som forventet på søylene, men ikke på takplaten. Vi kunne ikke avdekke årsaken til at verktøyet ikke kunne lese armeringen på takplaten. Vi måtte derfor konkludere med

at det var en ukjent teknisk feil, enten i bruken av Revit og SOFiSTiKs armerings- og detaljeringsverktøy, eller en feil vi ikke kjente til i innstillingene av SOFiSTiK-verktøyet.

3.4.4 Framgangsmåte RAM-Structural System

Framgangsmåten for RAM-Structural System består av to hoveddeler. I den første delen modelleres en rammekonstruksjon først i Revit. Deretter utføres analyse og armeringsdesign i RAM-Structural System før den eksporteres tilbake til Revit. Den andre delen fokuserer på den basiske modulære enheten, som er beskrevet i kapittel 3.5.1. Denne delen av prosessen håndteres utelukkende i RAM-Structural System. Formålet med disse framgangsmåtene er beskrevet i kapittel 3.3.1.

3.4.4.1 Rammekonstruksjon

I Revit lagde vi en modell som beskrevet i kapittel 2.5.2, bestående av to søyler og en bjelke med geometri som beskrevet i Tabell 5.

Tabell 5: Geometriske data for elementene

Element	Lengde [m]	Tverrsnitt $b * h$ [mm]
Bjelke	3	300 * 450
Søyler	6	450 * 500

I RAM Manager valgte vi å bruke SI som enhet, og for armeringstabellen ramec2 som er Eurokode sin standard. Hvordan dette gjøres er nærmere beskrevet i kapittel 2.7.3. Modellen var opprettet på måten kapittel 2.7.4 forklarer, og type last, plassering av denne og mengden er vist i Tabell 6. Ved overføringen la vi merke til hele modellen lå i samme etasje, Level 2, mens i Revit var søylene opprinnelig modellert i Level 1 og bjelken i Level 2. Dette hadde ingen betydning for analysen og designet, men var uansett en observasjon å merke seg.

Tabell 6: Type, plassering og mengde last for bjelken

Type last	Plassering	Mengde[enhet]
Permanent linjelast	På bjelkene	75 kN/m

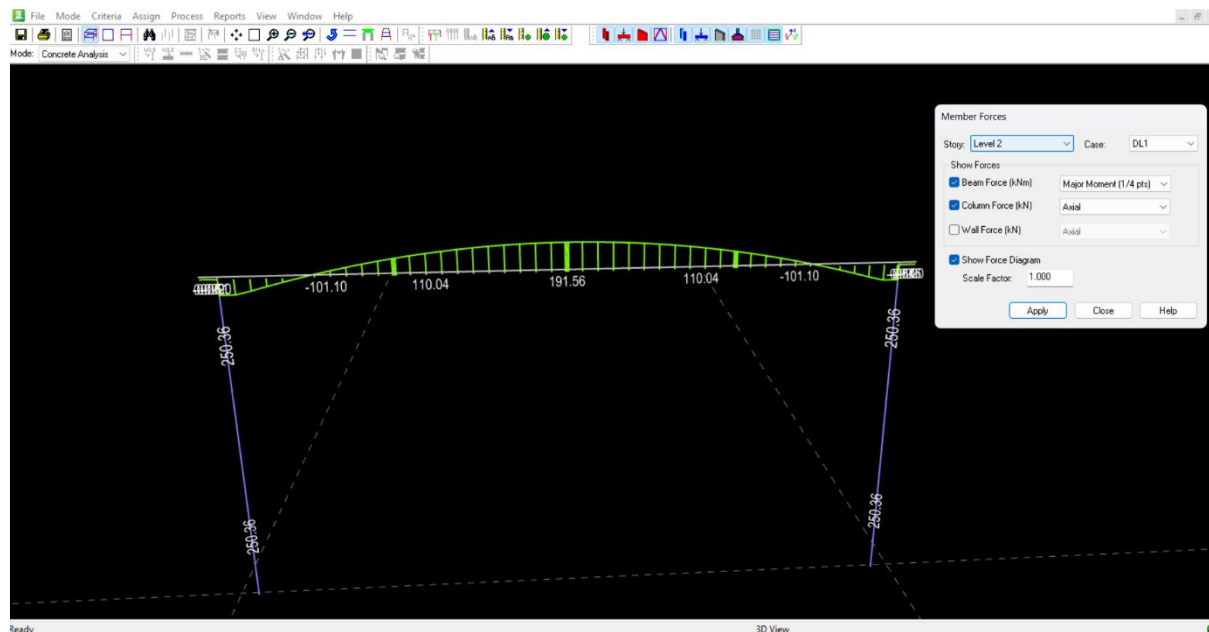
Materialeegenskapene valgt for betongen og armeringsstålet, samt UW og UW for selfweight vises i Tabell 7.

Tabell 7: Materialeegenskapene for betongen og armeringsstålet. I tillegg viser UW og UW for selfweight hva egenvekt og elastisitetsmodul blir beregnet ut ifra

Trykkfasthet $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	UW $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$	UW for selfweight $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$	Flytgrense $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$
45	2350	2400	500

3.4.4.1.1 Concrete Analysis

For å utføre analysen i Concrete Analysis la vi inn EN-1992-1-1 under Criteria, og hvordan dette ble gjort er beskrevet i kapittel 2.7.5.2. Når vi utførte analysen ble resultatene visualisert i 3D som beskrevet i kapittel 2.8.2.1.



Figur 73: Bøyemomentet som oppstår i bjelken visualisert

Vi så at det største bøyemomentet opptrår på midten av bjelken (Figur 73), og det var som forventet da dette punktet er lengst unna innfestningen. Videre så vi at skjærkraften var størst ved søylene og at vertikalkreftene virket på hver søyle. Disse resultatene ble også gitt i rapportform (På side 29-36 av vedlegg B) under Reports i verktøylinjen, men disse ga ingen ytterligere informasjon om beregningsmetode. Tabell 8 viser analyseresultatene.

Tabell 8: Vertikalkrefter og de største bøyemomentene og skjærkreftene som virker på modellen

Vertikalkrefter [kN]	Bøyemoment [kNm]	Skjærkraft [kN]
250.36	191.56	216.79

3.4.4.1.2 Concrete Beam

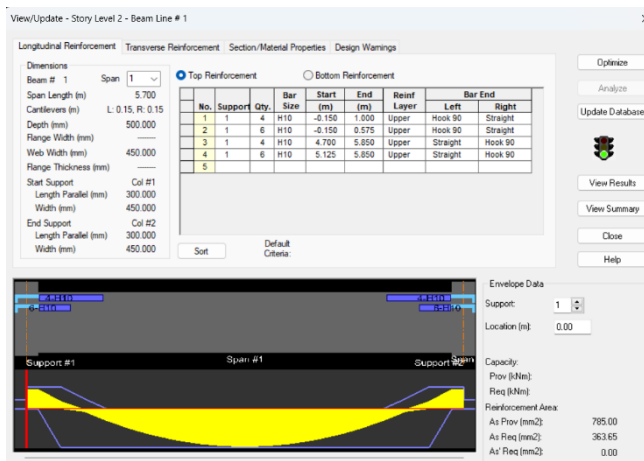
Concrete Beam ble brukt for å designe bjelken som beskrevet i kapittel 2.7.5.3. Kriteriene for armeringsdesignet er vist i Tabell 9 og ble lagt inn under Criteria som vist i kapittel 2.7.5.3.1.

Tabell 9: Overdekning, minimumsdiameter og maksimumdiameter for lengde- og skjærarmering i bjelken

	Overdekning [mm]	Minimumdiameter [mm]	Maksimumdiameter [mm]
Lengdearmering	40	6	25
Skjærarmering	40	6	6

Lastkombinasjonene ble lagt inn på samme måte som beskrevet i kapittel 2.7.5.3.3. Vi valgte byggekode EN 1990:2002 og da genererte programvaren 1.35 for permanentlast.

Armeringsdesignet ble utført som beskrevet i kapittel 2.7.5.3.4. Vi så at det ikke ble gitt noen Design Warnings, og i den visuelle framstillingen av momentdiagrammet (Figur 74) så vi at det største dimensjonerende momentet var på undersiden midt i bjelkens lengde og den største dimensjonerende skjærkraften oppsto ved søylene.



Figur 74: Funksjonene View/Update som viser momentdiagram og tabell over armeringsdesignet

I rapporten Beam Design (På side 40 av vedlegg B) så vi at beregningsgrunnlaget var EN 1992-1-1, som brukes for prosjektering av betongkonstruksjoner. Rapporten ga i øverste del informasjon om bjelkens geometriske data og materialegenskapene, som også beskrevet i Tabell 5 og Tabell 7. Rapporten ga også informasjon om armeringen slik som beskrevet i kapittel 2.8.2.2, men den ga ingen informasjon om konkrete henvendelser for beregningsgrunnlag slik som det ble i Column Design. Vi så likevel at programvaren beregner dimensjonerende moment- og skjærkraft samt kapasitet, for snitt langs bjelken med 10 til 30 cm mellomrom. For disse snittene ble det også rapportert nødvendig- og gitt armering både for underkant og overkant av bjelken. Detaljene for skjærarmeringen var også beregnet i flere snitt, denne inkluderte også torsjonskrefter. Rapporten viste ingenting om hvilke lastkombinasjoner som var brukt. Dette ble kun nevnt i en egen rapport som het Load Combinations, og den viste bare en oppstilling av kombinasjonene som var generert under Combinations, som for rammekonstruksjonen var 1.35D. Rapporten Material Takeoff er beskrevet i kapittel 2.8.2.2. Fra rapporten så vi totalt antall, lengde og vekt for armeringsdesignet. Dette er oppgitt i Tabell 10.

Tabell 10: Antall, lengde og vekt av den totale mengden lengde- og skjærarmering for bjelken

	Antall [stk]	Lengde [m]	Vekt [kg]
Lengdearmering	23	34	73
Skjærarmering	19	85.04	19

3.4.4.1.3 Concrete Column

Concrete Column brukte vi for å designe armeringen til søylene som beskrevet i kapittel 2.7.5.4. Vi bestemte i Criteria, forklart i kapittel 2.7.5.4.1, kriteriene for armeringsdesignet. Disse er oppgitt i Tabell 11.

Tabell 11: Kriteriene satt for armeringsdesignet i søylene

	Overdekning[mm]	Minimumdiameter[mm]	Maksimumdiameter[mm]
Lengdearmering	30	6	25
Skjærarmering	30	6	6

Vi brukte Design All som forklart i kapittel 2.7.5.4.3 for å designe armeringen, og armeringsdesignet ga ingen Design Warnings. I gjennomgangen av rapporten Column Design (På side 45 av vedlegg B) så vi at beregningsgrunnlaget for armeringen var basert på EN 1992-1-1. I øvre del av rapporten var det på samme måte som i Beam Design gitt detaljer for geometriske data og materialegenskaper, og disse er vist i Tabell 5 og Tabell 7. Rapporten inneholdt også direkte henvisninger til de forskjellige kapitlene i EN 1992-1-1 brukt til å beregne dimensjonerende krefter og dimensjonerende kapasitet (Figur 75). I tillegg viste rapporten også at henvisningene var brukt for å beregne både nødvendig og gitt armering. Column Design oppga også at den brukte 1.35D som lastkombinasjon.

Axial capacity ratio N_{Ed} / N_{Rd}	= 0.07
Axial Capacity \geq Axial	OK for axial resistance
Major Axis Capacity M_{Rdy}	= 333.07 kNm
Major Axis Capacity Ratio M_{Edy} / M_{Rdy}	= 0.02
Major Axis Capacity \geq Major Axis Moment	OK for moment resistance
Minor Axis Capacity M_{Rdz}	= 201.44 kNm
Minor Axis Capacity Ratio M_{Edz} / M_{Rdz}	= 0.82
Minor Axis Capacity \geq Minor Axis Moment	OK for moment resistance
Biaxial Interaction Equation	$= [(M_{Edz}/M_{Rdz})^a + (M_{Edy}/M_{Rdy})^a] \leq 1,0$
	(5.39)

Figur 75: Utklipp fra rapporten som viser at det er gjort kontroll av aksial, biaksial- og momentkapasitet

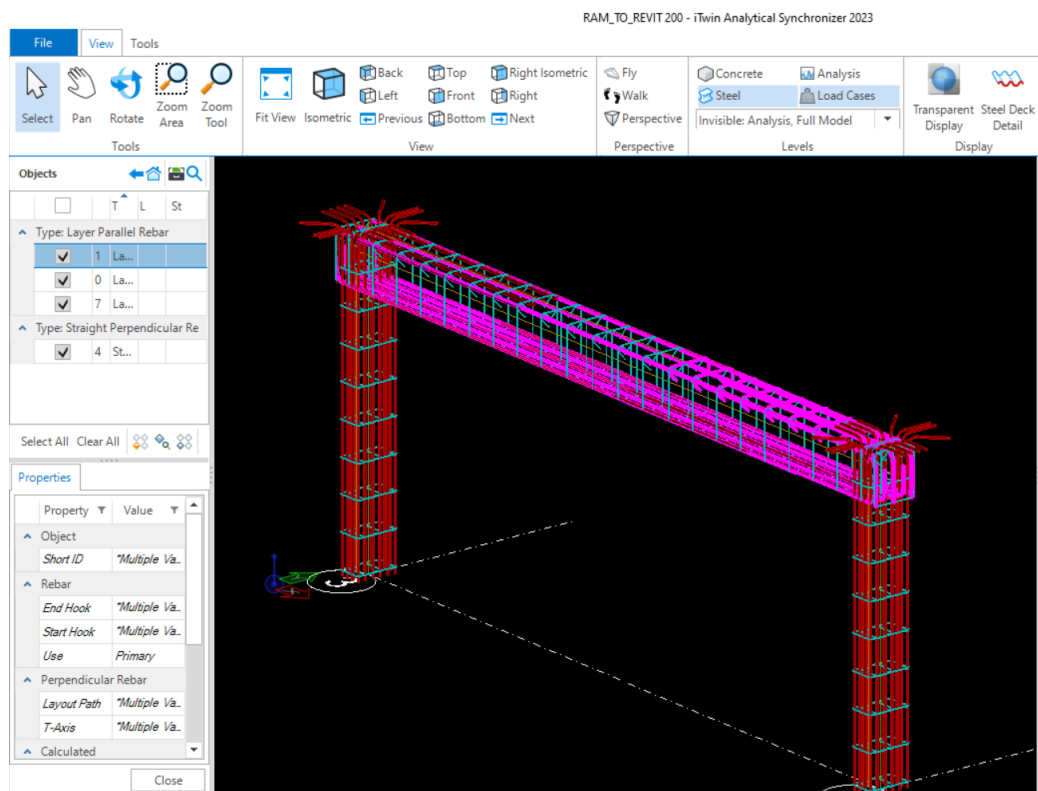
Den neste rapporten vi så på var Material Takeoff, som er forklart nærmere i kapittel 2.8.2.2. Det totale antall, lengde og vekt for armeringen er vist i Tabell 12.

Tabell 12: Antall, lengde og vekt av den totale mengden lengde- og skjærarmering for søylene

	Antall[stk]	Lengde[m]	Vekt[kg]
Lengdearmering	24	72	178
Skjærarmering	20	24.72	5

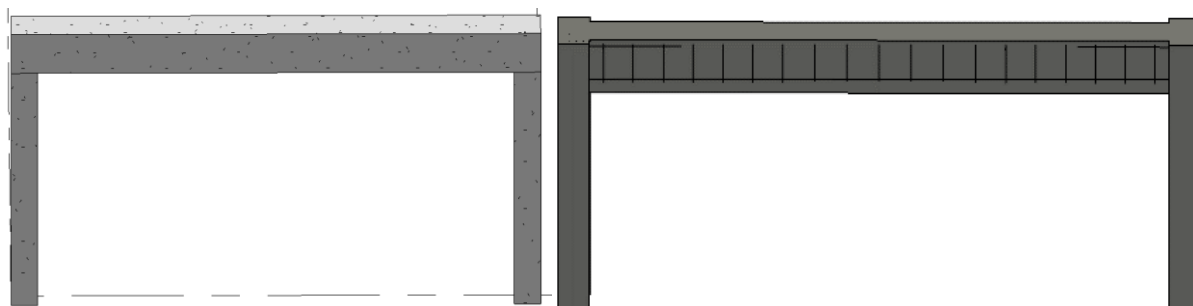
3.4.4.1.4 Eksportering av modellen

Vi eksporterte modellen fra RAM-Structural System til Revit som beskrevet i kapittel 2.7.6. Når modellen åpnet seg i iTwin var armeringen visualisert inn i modellen på en god måte, og vi la blant annet merke til at det var sammenkobling mellom armeringen i bjelken og søylene (Figur 76).



Figur 76: Visualisering av modellen ved eksportering fra RAM-Structural System til Revit i iTwin Analytical Synchronizer

Vi valgte derfor å eksportere hele modellen inn i Revit og når dette var gjort observerte vi noen vesentlige feil. Det vi først la merke til var endringer i modellens høyde. Modellens totale høyde



Figur 77: Modellen i Revit før og etter analyse og armeringsdesign.

hadde sunket med 500 mm fordi bjelken har gått ifra å hvile på søylene til å gå inn i søylene, og dette gjorde at modellen hadde blitt lavere. Bjelkens tverrsnitt hadde også endret seg fra 450 * 500 mm til 300 * 600 mm.

og geometriske data for modellen så inneholder de ikke spesifikk informasjon om de underliggende beregningene eller metodene brukt for analysen. Resultatet av de største kreftene vises i Tabell 14.

Tabell 14: Største vertikalkrefter, bøyemoment og skjærkrefter som virker på elementene i modellen

Element	Bøyemoment [kNm]	Skjærkraft [kN]
Bjelker 6m	116.38	102.17
Bjelker 3m	35.95	82.76
Søyler	127.49	455.71

3.4.4.2.2 Concrete Beam

I Concrete Beam designet vi armeringen for bjelkene som vist i kapittel 2.7.5.3. Kriteriene for armeringsdesignet er de samme som for rammekonstruksjonen i kapittel 3.5.4.1.2 og er vist i Tabell 9. For lastkombinasjonene valgte vi EN 1990:2002, og programmet ga totalt 6 lastkombinasjoner, hvor D er permanentlast og Sp er variabel last (Figur 80).

1	<input checked="" type="checkbox"/>	1.350 D	
2	<input checked="" type="checkbox"/>	1.000 D	
3	<input checked="" type="checkbox"/>	1.350 D + 1.050 Sp	
4	<input checked="" type="checkbox"/>	1.000 D + 1.050 Sp	
5	<input checked="" type="checkbox"/>	1.148 D + 1.500 Sp	
6	<input checked="" type="checkbox"/>	1.000 D + 1.500 Sp	

Figur 80: Genererte lastkombinasjoner ut ifra EN 1990:2002

Designet av armeringen var lik som prosedyren for rammekonstruksjonen i kapittel 3.5.4.1.2. Armeringsdesignet ga ingen Design Warnings, og vi så i visualiseringen at det største dimensjonerende momentet oppsto på midten av bjelkene, mens den største dimensjonerende

TOP LONGITUDINAL REINFORCEMENT:

Set	Size	Num	Eff.	Layer	Start		End		End-Condition	
			Depth (mm)		Supp.	Loc. (m)	Supp.	Loc. (m)	Start	End
5	H08	2	396.000	Upper	2	-6.000	2	-0.000	Hooked	Hooked
7	H08	4	396.000	Upper	2	-0.975	2	-0.000	Straight	Hooked

Clear Bar Cover (mm):..... Top: 40.000 Side: 40.000

BOTTOM LONGITUDINAL REINFORCEMENT:

Set	Size	Num	Eff.	Layer	Start		End		End-Condition	
			Depth (mm)		Supp.	Loc. (m)	Supp.	Loc. (m)	Start	End
1	H25	2	387.500	Lower	1	0.000	1	6.000	Hooked	Hooked
3	H25	1	387.500	Lower	1	1.225	1	4.775	Straight	Straight

Clear Bar Cover (mm):..... Bot.: 40.000 Side: 40.000

Figur 81: Utklipp fra Beam Design som viser armeringsdesignet for topp og bunn i bjelken

skjærkraften var ved søylene. I rapporten Beam Design (På side 21 av vedlegg B) kunne vi se at programvaren hadde brukt samme måte for beregninger som for rammekonstruksjonen. Rapporten ga heller ikke her spesifikke henvisninger til Eurokode, bortsett fra at EN 1992-1-1 ble brukt som beregningsgrunnlag. I øverste del av rapporten ble det beskrevet designet armering for over- og underside av bjelken (Figur 81), inkludert størrelse, endeavslutninger og overdekning.

Rapporten beskrev også både nødvendig og designet armering for mange snitt langs bjelken både for langsgående armering på underside og overside i tillegg til for skjærarmeringen. For eksempel kunne vi se for den ene bjelken på 6 meter at nødvendig armering for undersiden i 3 meter var 1286 mm^2 . mens designet armering på dette punktet var 1473 mm^2 . Til tross for at vi hadde opprettet flere lastkombinasjoner viste ikke rapporten hvilke som var brukt, disse ble kun listet i en egen rapport som het Load Combinations.

Material Takeoff rapporten ga en samlet beskrivelse av antall, lengde og vekt for armeringen i bjelken. Disse er lagt inn i Tabell 15 nedenfor.

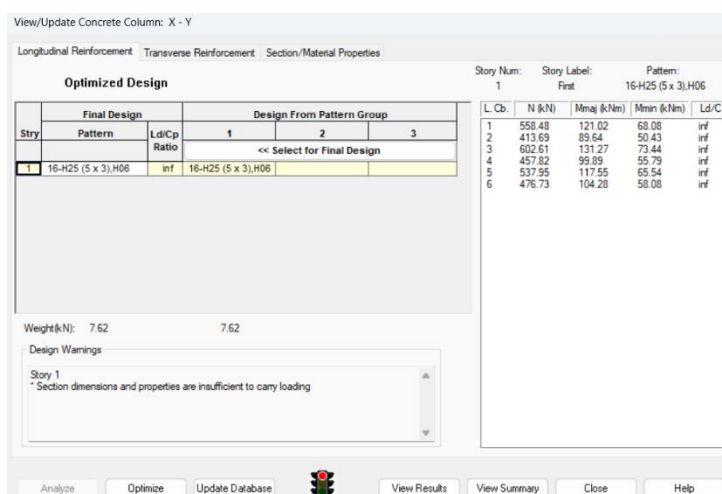
Tabell 15: Antall, lengde og vekt av den totale mengden lengde- og skjærarmering for bjelkene

	Antall [stk]	Lengde [m]	Vekt [kg]
Lengdearmering	40	94.40	153
Skjærarmering	60	87.60	54

3.4.4.2.3 Concrete Column

Concrete Column ble brukt for å designe søylene som beskrevet i kapittel 2.7.5.4, i tillegg til at det ble brukt de samme kriteriene som for rammekonstruksjonen i kapittel 3.5.4.1.3.

Ved gjennomgang av View/Update (Figur 82), ble det oppdaget at det var en Design Warning for alle søylene. Advarselen sa at "Section dimensions and properties are insufficient to carry loading", noe som betyr at tverrsnittet for søylene var for lite til å plassere den



Figur 82: View/Update hvor armeringsdesign og Design Warning med forklaring til denne var vist

nødvendige armeringen. For å se nærmere på hva som ga Design Warning, ble det brukt rapporten Column Design (På side 25 av vedlegg B).

Rapporten var utformet på samme vis som for rammekonstruksjonen og det sto også her at EN 1992-1-1 var brukt som beregningsgrunnlag, i tillegg til at den henviste direkte til kapitler og ligninger i denne. I rapporten så vi for eksempel at den dimensjonerende aksialkapasiteten var god, men både det dimensjonerende momentet og den biaksiale bøyningen oversteg søylens dimensjonerende kapasitet (Figur 83).

Axial Capacity NRd	= 5044.18 kN
Axial capacity ratio NEd / NRd	= 0.11
Axial Capacity ≥ Axial	OK for axial resistance
Major Axis Capacity MRdy	= 0.00 kNm
Major Axis Capacity Ratio MEdy / MRdy	= inf
Major Axis Capacity < Major Axis Moment	NOT OK for moment resistance
Minor Axis Capacity MRdz	= 0.00 kNm
Minor Axis Capacity Ratio MEdz / MRdz	= inf
Minor Axis Capacity < Minor Axis Moment	NOT OK for moment resistance
Biaxial Interaction Equation	= [(MEdz/MRdz)^a + [(MEdy/MRdy)]^a ≤ 1,0 (5.39)
Where exponent a	= 1.01
Biaxial Interaction Equation = [(68.08/0.00)]^1.01 + [(121.02/0.00)]^1.01	= inf
Biaxial Interaction Result > 1.0	Not OK for biaxial resistance

Figur 83: Utklipp fra Column Design Report som viser kontroll av dimensjonerende aksial- og momentkapasitet

Column Design rapporten oppga kun at programvaren brukte lastkombinasjon 1.35D for beregning, og for å se de andre lastkombinasjonene måtte vi inn i rapporten Load Combinations på samme måte som beskrevet i kapittel 3.5.4.2.2.

Informasjonen om armeringen fra Material Takeoff er gitt i Tabell 16.

Tabell 16: Antall, lengde og vekt av den totale mengden lengde- og skjærarmering for søylene

	Antall [stk]	Lengde [m]	Vekt [kg]
Lengdearmering	64	192	741
Skjærarmering	40	37.44	8

I neste kapittel vil vi komme med viktigste funnene av utforskningen som vi mener er at de kan hjelpe å besvare oppgavens problemstilling.

4 RESULTATER

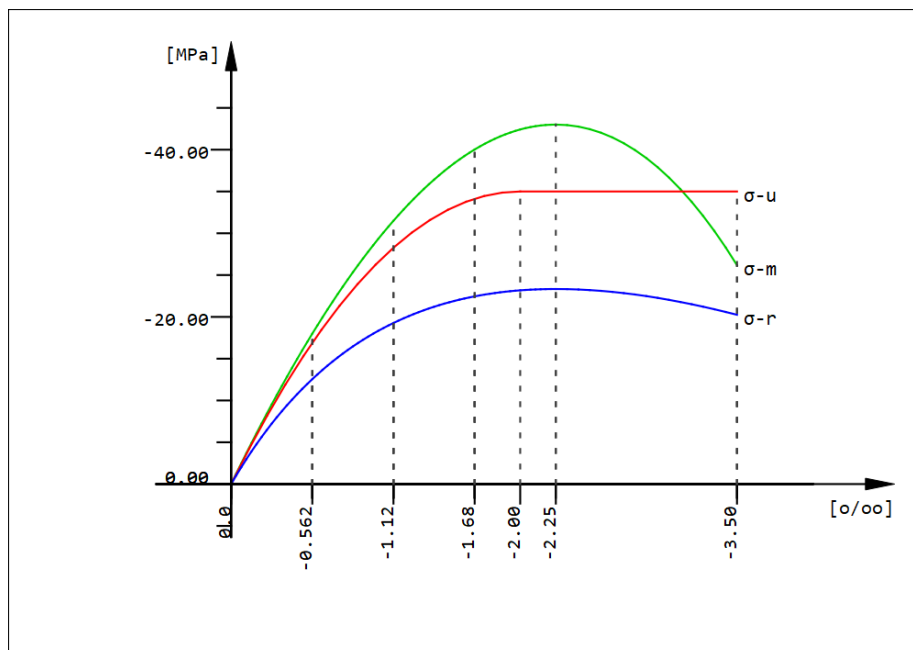
I denne delen presenteres hovedfunnene fra designprosessen basert på FEM-analyse ved bruk av SOFiSTiK og RAM Structural System. Hovedfunnene gir innsikt i potensialet til SOFiSTiK og RAM Structural System når det gjelder generering og automatisering av armeringsdesign, samt integreringen med Revit. Funnene gir også innsikt i hvilken programvare som gir mer pålitelige og brukbare resultater med hensyn til optimalisering og nøyaktighet i konstruksjonsprosjekter.

4.1 Generering armering og beregningsgrunnlag for armering

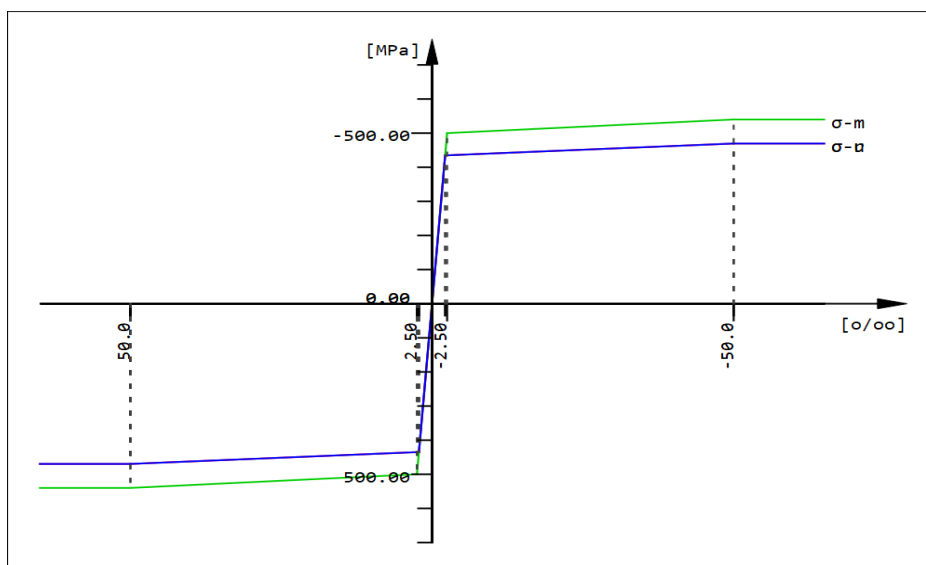
Utforskningen viser at både SOFiSTiK og RAM Structural System generer armering basert på FEM-analyse av konstruksjonen. Både SOFiSTiK og RAM benytter FEM-analyse som beregningsgrunnlag for å generere den nødvendige armeringen av de ulike delene av konstruksjonen. Begge programmene benytter EC2 som beregningsmetode for denne armeringen. Imidlertid varierer omfanget av deres bruk av EC2 mellom de to programmene. Hvordan EC2 benyttes i SOFiSTiK og RAM, vil følge i de neste delkapitallene:

4.1.1 SOFiSTiK

FEM-analyserapporten fra SOFiSTiK for Case-studien av den modulære enheten viser at verktøyet gjennomfører alle mulige og relevante aspekter som påvirker konstruksjonens styrke. Rapporten dekker materialspesifikasjoner for C35/45 (som tilsvarer B35) og B500B i stålarmeringen, med detaljer om deres mekaniske egenskaper som Youngs modulus, Poissons ratio, og sikkerhetsfaktorer. Den viser også spennings-tøyings-diagrammer (Figur 84 & Figur 85) for ulike lasttilstander og gir detaljer om tverrsnittsdimensjoner, armeringslag og statiske egenskaper som tverrsnittareal og bøyingsmomenter av treghet. Lasttilfeller med tilhørende sikkerhetsfaktorer er inkludert. På denne måten demonstrerer SOFiSTiK-verktøyet detaljgraden som inngår i analysen av konstruksjonen.



Figur 84: Spennings-tøyningskurve for betong B35, som vist i analyserapporten fra SOFiSTiK.



Figur 85: Spennings-tøynings diagram for armeringsstål, som vist i analyserapporten fra SOFiSTiK.

Designresultatene for de ulike konstruksjonsdelene viser at SOFiSTiK-verktøyet detaljert gjennomgår bruk av EC2s dimensjoneringsmetoder for armering av betongkonstruksjoner. Designverktøyene gir detaljert informasjon om de ulike kapitlene og seksjonene i EC2 som ble benyttet for armeringsdesign. Rapportene beskriver hvilket kapittel eller seksjon som benyttes for hvilket formål. Man kan verifisere dette ved å gjennomgå EC2-manualen for å se om kapitlet eller seksjonen ble benyttet i samsvar med det forventede formålet. På denne måten

demonstrerer og verifiserer SOFiSTiK-verktøyet at armeringsdesignresultatene er forsvarlige og brukbare.

Armeringsresultatene for de ulike konstruksjonsdelene av modellen viser at SOFiSTiK-verktøyet undersøker konstruksjonselementenes styrke og sårbarhet i minste detalj. Armeringsfordelingen i konstruksjonselementene, spesielt bjelkene og takplaten, viser at verktøyets undersøkelse av konstruksjonens påkjenning fra lastene er grundig.

SOFiSTiK-verktøyer viser at generering av armering for de ulike konstruksjonsdelene er i samsvar med ULS og SLS av EC2 dimensjonering retningslinjer for betongkonstruksjoner. Verktøyene viser at endringen av den genererte armering fra den ene retningslinje til den andre retningslinje, og gir forklaring om endringen. I tillegg til de armeringsfordelingen langs bjelken eller takplaten, gir også verktøyene forklaring av brukte kapiteler, variabelers betydning i rapporten, inkludert verifisering av beregningen for armering.

Minimum reinforcement areas EN 1992-1-1, Ch. 7.3.2, $w_k = 0.3[\text{mm}]$

Ncs	x[m]				As,sel
2	1.379	tensile strength concrete $f_{ct,eff} =$	3.21	[MPa]	
		Act area of tensional zone	0.0675	[m ²]	
		reference diameter	20.00	[mm]	
		steelstress acc. Table 7.2	240.37 ¹	[MPa]	
		coefficient k	1.000 ²		
		coefficient $k_1 \cdot d_0 / d'$	1.500		
		coefficient k_c	0.400		
		As,req	3.61	[cm ²]	< 9.42[cm ²]✓
2	3.055	tensile strength concrete $f_{ct,eff} =$	3.21	[MPa]	
		Act area of tensional zone	0.0675	[m ²]	
		reference diameter	10.00	[mm]	
		steelstress acc. Table 7.2	339.94 ¹	[MPa]	
		coefficient k	1.000 ²		
		coefficient $k_1 \cdot d_0 / d'$	1.500		
		coefficient k_c	0.400		
		As,req	2.55	[cm ²]	< 9.42[cm ²]✓

¹ $\sigma_s = \sqrt{w_k \cdot 3.48 \cdot 1.0E06 \cdot f_{ct,eff} / (2.9 \cdot d_s)}$

² Coefficients based on minimal thickness according to EN 1992-1-1, Ch. 7.3.2

Figur 86: Tabell som inneholder informasjon om minimum armeringsareal i henhold til EN 1992-1-1

4.1.2 RAM-Structural System

Resultatene fra FEM-analysen fra Case-studiene ble presentert i totalt åtte rapporter (På side 1-14 av vedlegg B) og disse ga en detaljert oversikt over modellens materialeegenskaper, de anvendte kriteriene og de oppnådde resultatene. Dette bekreftet hva som ble beskrevet i teorikapittel 2.6.5.2.4. Ved å i tillegg gi informasjon om selve analysemodellen med opprettelse av nodes og analysestasjoner, viste RAM-Structural System at det ble anvendt nøyaktige prosedyrer for å utføre FEM-analysen. Resultatene fra FEM-analysen ga innsikt i krefter på modellen for alle lasttilfeller, som vist for en bjelke i basis modulær enhet i **Feil! Fant ikke referansebildet.**, noe som understreket programvarens evne til å gi en fremstilling av de strukturelle belastningene og deres effekter på modellen.

Beam No.	Case	Force	Station (% of beam span length)				
			0	25	50	75	100
7	Dead Load	Moment (kNm)	0.00	61.63	101.90	61.57	0.00
		Shear (kN)	96.11	35.07	-0.05	-35.10	-96.07
		Torsion (kNm)	2.37	1.87	-0.00	-1.87	-2.36
	Live Load	Max Mom (kNm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Min Mom (kNm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Max Shear (kN)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Min Shear (kN)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Max Torsion (kNm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Min Torsion (kNm)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
		Live Load Reduction Factors: Reducible LL = 0.00% Storage LL = 0.00%					
	Roof LL	Moment (kNm)	0.00	8.95	14.48	8.94	0.00
		Shear (kN)	6.06	4.61	-0.00	-4.61	-6.06
		Torsion (kNm)	0.12	0.11	-0.00	-0.10	-0.12
		Live Load Reduction Factor: Roof LL = 0.00%					

Figur 87: Utklipp fra Beam Line Force Envelope som viser bøyemoment, skjær- og torsjonskrefter for hvert lasttilfelle i 5 ulike punkter av bjelken.

I RAM-Structural System var det en forskjell i hvordan dokumentasjonen for armeringsdesign ble håndtert for bjelker sammenlignet med søyler som vist i kapittel 3.4.4.1.2 og 3.4.4.1.3. Beam Design-rapporten (På side 21-23 av vedlegg B) viste at beregningsgrunnlaget var i tråd med EN 1992-1-1, men det manglet henvisninger til spesifikke kapitler, noe som begrenset muligheten for å verifisere beregningene direkte. I motsetning til dette, inneholdt Column Design-rapporten (På side 25-27 av vedlegg B) direkte henvisninger til bestemte kapitler og avsnitt i EN 1992-1-1, slik som for eksempel uttrykk 5.13N for beregning av slanketskriteriet for enkeltstående konstruksjonsdeler, vist i Figur 88. Dette gjorde det mulig å verifisere designvalgene mer direkte. Ut ifra rapportene ble det vist at programvaren ikke tar hensyn til SLS, kun ULS. Videre inneholdt ikke dokumentasjonen i RAM-Structural System informasjon om inkludering av nasjonale tillegg i Eurokode 2, noe som kunne ha påvirket beregningsgrunnlaget. Disse observasjonene bekrefter behovet for mer omfattende og detaljert dokumentasjon for å støtte verifiseringen av designvalg i samsvar med gjeldende standarder.

Slenderness		
λ_{lim}	$= 20 ABC / \sqrt{n}$	(5.13N)
$n = NEd / (Ac fcd) = 558 \times 10^3 / (90000 \times 19.8)$		= 0.313
Major $\lambda_{lim, y} = 20 \times 1.00 \times 2.20 \times 0.70 / \sqrt{0.313}$		= 54.99
Minor $\lambda_{lim, z} = 20 \times 1.00 \times 2.20 \times 0.70 / \sqrt{0.313}$		= 54.99
λ	$= 10 / i$	(5.14)
$\lambda_y = 6900 / 86.60$		= 79.67
$\lambda_z = 6900 / 86.60$		= 79.67
Column is		SLENDER

Figur 88: Utklipp fra Column Design som viser beregning av slanketskriterium med henvisning til 5.13N i EC2.

Selv om Beam Design-rapporten manglet direkte henvisninger til Eurokode 2, bekreftet den armeringsdesignet gjennom informasjon om materialegenskaper, dimensjonerende krefter, kapasitet og armeringsdetaljer. Den spesifiserte trykkfasthet og elastisitetsmodul for betong,

samt flytegrense og elastisitetsmodul for armeringsstål, og viste nødvendig og designet armering langs bjelken. Column Design-rapporten henviste til EC2 og inkluderte detaljer om langsgående og skjærarmering, samt materialegenskaper som trykkfasthet, densitet og elastisitetsmodul for betong, og flytegrense og elastisitetsmodul for armeringsstål. Dette bekreftet at kritiske faktorer for armeringsdesignet var inkludert.

4.2 Visualisering av resultat

Både SOFiSTiK og RAM Structural System visualiserer modellen, analyse- og designresultatene på hver sin måte og med varierende grad av klarhet. Den følgende kapiteldelen vil vise hva som ble funnet ut om visualiseringsevnene til begge programvarene.

4.2.1 SOFiSTiK

SOFiSTiK har verktøy som er tilegnet visualisering av resultater. Verktøyene som ble forklart i kapittel 2.7.1 og underkapitlene av kapittel 2.7.1, fungerer stort sett som beskrevet i brukermanualen. Visualisering av muligheten er delt i tre:

Analyseresultater og Designresultater:

Verktøyet for visualisering av analyse- og designresultater presenterer de ulike resultatene fra FEM-analysen og designresultater. Verktøyet ser ut til å vise alle mulige resultater for en konstruksjonsmodell.

Armerings sjekker: Armerings sjekker viste både nødvendig armering, levert armering og differansen mellom dem for søylene. Likevel viste ikke verktøyet armeringen som ble levert for takplaten, mens det viser hva som er nødvendig armering for takplaten. Det kunne heller ikke identifiseres hva som var årsaken til at verktøyet ikke kunne lese armeringen som ble levert for takplaten.

En fullstendig framstilling av resultatene er detaljert forklart i kapittel 3.4.3.5.

4.2.2 RAM-Structural System

Visualiseringen av resultatene i RAM-Structural System omfattet både FEM-analyse og armeringsdesign som beskrevet i kapittel 2.7.2, og verktøyene som ble brukt var i samsvar med dette kapitlet.

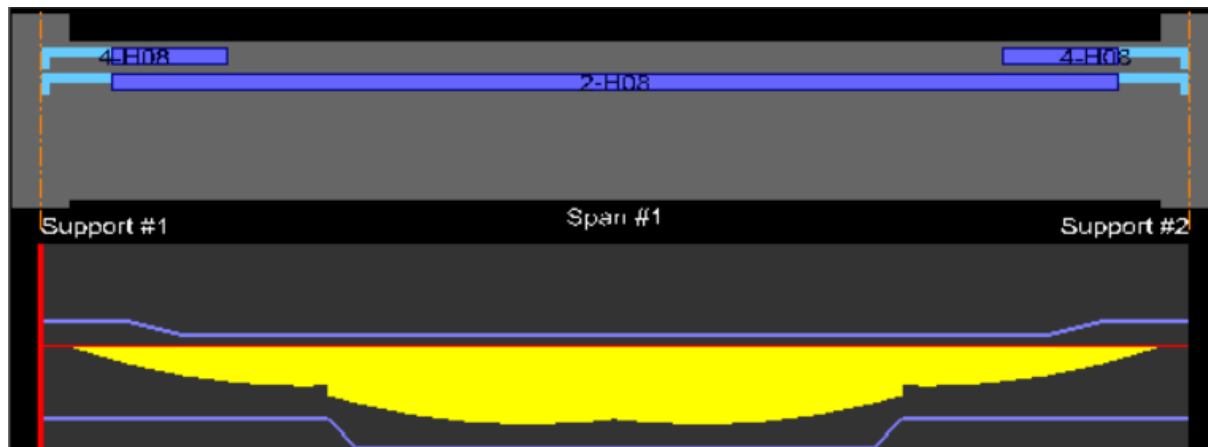
4.2.2.1 Analyseresultater

Visualiseringen av resultatene for FEM-analysen viste seg å være konsistent med det som var forklart i kapittel 2.7.2 og dette gjorde det mulig å se både reaksjonskreftene og hvordan kreftene påvirket konstruksjonselementene. For eksempel kunne man for Basis modulær enhet

se bøyemoment og skjærkrefter representert gjennom både diagrammer og numeriske verdier på modellen. Forskyvningene for takplaten ble vist i med et fargeplott som viste intensiteten til kreftene. Dette hjalp til med å forstå hvor kreftene var, og hvordan de påvirket strukturens integritet.

4.2.2.2 Designresultater

Visualiseringen for armeringsdesignet ble forklart i kapittel 2.7.2.2 og det viste seg at RAM-Structural System hadde begrensede visualiseringsmuligheter for armeringen. For eksempel ble armeringsdesignet for bjelkene visualisert grafisk med informasjon om plassering, størrelse og antall armeringsjern som vist i Figur 89, noe som stemte med informasjonen i brukermanualen. Dette bekreftet at mulighetene for RAM-Structural System til å gi en detaljert visuell representasjon var mangelfulle. Dette ble videre bekreftet for armeringsdesignet for søylene som ikke ble visualisert grafisk overhode.



Figur 89: Utklipp fra View/Update som viser plassering, størrelse, antall og endeavslutninger for armeringen grafisk

4.3 Optimalisering og nøyaktighet

Optimalisere er å gjøre så godt som mulig, å bringe en prosess eller et system til et optimum under de betingelsene som er gitt (Grøn, 2023).

Nøyaktighet er i hvilken grad en måling eller en serie målinger gir uttrykk for den egentlig sanne verdien av det fenomenet man ønsker å vite noe om (Braut, 2019).

4.3.1 SOFiSTiK

Designresultatene fra SOFiSTiK viser at programvaren optimaliserer armeringen for å bruke den laveste mengden som kan tåle den belastningen og påkjenningen som oppstår på konstruksjonsdelene. Programvaren viser dette ved å sammenligne den forhåndsarrangerte armeringen og den beregnede nødvendige armeringen for de ulike konstruksjonsdelene. Som eksempel, i Figur 90 fra designresultatene (på side 46 av vedlegg A3) sammenlignes nødvendig armering (Required) med forhåndsarrangerte armering (Basic) for forskjellige akser og posisjoner for en bjelke i den basis modulære enheten. Dette gir den ansvarlige ingeniøren fleksibilitet til å velge den mest optimale bruk av armeringen, da både alternativene presenteres.

Summary of the Required Reinforcement - Design Case No. 1

Axis	Spn./Sup.	x [m]	Basic			Required		
			As, z+[cm2]	As, z-[cm2]	as, w[cm2/m]	As, z+[cm2]	As, z-[cm2]	as, w[cm2/m]
A-1	A	0.000	2.37	9.42	9.47	2.37	13.09	6.03
		0.225	2.37	9.42	9.47	2.37	9.42	6.03
		0.635	2.37	9.42	9.47	2.37	9.42	6.03
		2.879	9.42	2.37	9.47	11.79	2.37	2.84
		3.029	9.42	2.37	9.47	11.71	2.37	2.84
		5.422	2.37	9.42	9.47	2.37	9.42	6.36
A-2	B	5.832	2.37	9.42	9.47	2.37	9.42	6.36
		6.057	2.37	9.42	9.47	2.37	13.63	6.36

As, z+ Lower longitudinal reinforcement Layer
 As, z- Upper longitudinal reinforcement Layer
 as, w shear reinforcement

Figur 90: Armerings resultat av en bjelke på den basis modulær enheten

Et annet eksempel, vist i Figur 91 fra designresultatene (på side 37 av vedlegg A3), sammenlignes nødvendig armering (Required) med forhåndsarrangerte armering (Basic) for ulike akser og posisjoner for en bjelke i den basis modulær enheten. Rapporten viser at det er betydelig forskjell mellom den arrangerte mengden skjærarmering og den nødvendige skjærarmeringen, noe som viser optimaliseringen.

Summary of the Required Reinforcement - Design Case No. 1

Axis	Spn./Sup.	x [m]	Basic			Required		
			As, z+[cm2]	As, z-[cm2]	as, w[cm2/m]	As, z+[cm2]	As, z-[cm2]	as, w[cm2/m]
B-1	A	0.000	2.37	9.42	9.47	2.37	13.36	6.23
		0.112	2.37	9.42	9.47	2.37	11.15	6.23
		0.225	2.37	9.42	9.47	2.37	9.42	6.23
		0.362	2.37	9.42	9.47	2.37	9.42	6.23
		0.498	2.37	9.42	9.47	2.37	9.42	6.23
		0.635	2.37	9.42	9.47	2.37	9.42	7.76
		0.785	2.37	9.42	9.47	2.37	9.42	6.49
		0.934	9.42	2.37	9.47	9.42	2.37	6.17
		1.084	9.42	2.37	9.47	9.42	2.37	4.88
		1.233	9.42	2.37	9.47	9.42	2.37	4.23
		1.383	9.42	2.37	9.47	9.42	2.37	3.72
		1.533	9.42	2.37	9.47	9.42	2.37	3.87
		1.682	9.42	2.37	9.47	9.42	2.37	3.39
		1.832	9.42	2.37	9.47	9.42	2.37	2.91
		1.981	9.42	2.37	9.47	9.42	2.37	2.84
		2.131	9.42	2.37	9.47	9.42	2.37	2.84
		2.281	9.42	2.37	9.47	10.20	2.37	2.84
		2.430	9.42	2.37	9.47	10.87	2.37	2.84
		2.580	9.42	2.37	9.47	11.37	2.37	2.84
		2.729	9.42	2.37	9.47	11.67	2.37	2.84
		2.879	9.42	2.37	9.47	11.79	2.37	2.84
		3.029	9.42	2.37	9.47	11.73	2.37	2.84
		3.178	9.42	2.37	9.47	11.79	2.37	2.84
		3.328	9.42	2.37	9.47	11.66	2.37	2.84
		3.477	9.42	2.37	9.47	11.34	2.37	2.84
		3.627	9.42	2.37	9.47	10.84	2.37	2.84
		3.777	9.42	2.37	9.47	10.16	2.37	2.84
		3.926	9.42	2.37	9.47	9.42	2.37	2.84
		4.076	9.42	2.37	9.47	9.42	2.37	2.84
4.225	9.42	2.37	9.47	9.42	2.37	2.93		
4.375	9.42	2.37	9.47	9.42	2.37	3.41		
4.525	9.42	2.37	9.47	9.42	2.37	3.89		
4.674	9.42	2.37	9.47	9.42	2.37	3.71		
4.824	9.42	2.37	9.47	9.42	2.37	4.22		
4.973	9.42	2.37	9.47	9.42	2.37	4.88		
5.123	9.42	2.37	9.47	9.42	2.37	6.14		
5.273	2.37	9.42	9.47	2.37	9.42	6.50		
5.422	2.37	9.42	9.47	2.37	9.42	7.75		
5.559	2.37	9.42	9.47	2.37	9.42	7.13		
5.696	2.37	9.42	9.47	2.37	9.42	6.87		
B-1	B, l	5.832	2.37	9.42	9.47	2.37	9.42	6.71
		5.945	2.37	9.42	9.47	2.37	11.15	6.62
		6.057	2.37	9.42	9.47	2.37	13.36	6.56
B-2	B	6.057	2.37	9.42	9.47	2.37	13.36	6.56

As, z+ Lower longitudinal reinforcement Layer
As, z- Upper longitudinal reinforcement Layer
as, w shear reinforcement

Figur 91: Armerings resultat av en bjelke på den basis modulær enheten

Disse eksemplene viser at SOFiSTiK effektivt sammenligner forhåndsarrangert armering og med den nødvendige armeringen, og optimaliserer mengden for å oppnå best mulig bruk av materialer under gitte betingelser.

Nøyaktigheten, definert som graden til hvilken en måling reflekterer den faktiske sanne verdien av det undersøkte fenomenet, kan verifiseres ved å sjekke hvilke seksjoner av EC2-standardene som ble benyttet for beregningsgrunnlaget på de aktuelle resultatene.

4.3.2 RAM Structural System

Designresultatene fra RAM-Structural System viste at programmet ga optimalisert armeringsdesign i samsvar med beregningsgrunnlaget i EC2 og den nødvendige armeringen. For eksempel viste rapporten for bjelken på 6 meter i basis modulær enhet i (På side 27 av vedlegg B) at nødvendig armering for undersiden i midten av bjelken var 1286 mm^2 , mens designet armering i dette punktet var 1473 mm^2 . Dette indikerer at programmet inkluderer en

sikkerhetsmargin, noe som er viktig for å sikre ekstra styrke og stabilitet under uforutsette belastninger.

For samme modell viste armeringsdesignet for skjærarmering i søylene at ut ifra den dimensjonerende skjærkraftkapasiteten var det ikke behov for skjærarmering. Likevel tok programvaren hensyn til kravene i EC2 og spesifiserte minimum nødvendig armering. Dette viste at RAM-Structural System ikke bare optimaliserte for å oppfylle de strukturelle kravene, men også for å sikre nøyaktighet ved overholdelse av gjeldende byggekoder. Dette viste at programvaren balanserte mellom effektiv bruk av materialer og nødvendige sikkerhetskrav, noe som ga en viss trygghet om at optimaliseringen fulgte anerkjente byggekoder.

RAM-Structural System så ikke utelukkende på hva som var nødvendig armering ut ifra dimensjonerende krefter, men tok også hensyn til forankringslengder og praktiske armeringsmetoder. Dette kunne resultere i at noen designede armeringer antydte overdimensjonering når man så på forholdet mellom nødvendig og designet armering. Dette kunne man for eksempel se i rapporten (På side 21 av vedlegg B) for langsgående armering i bjelken for den basis modulære enheten (Figur 92), hvor det ikke var dimensjonerende moment ved støttene, men programvaren ga likevel et armeringsdesign. Ved å inkludere disse praktiske hensynene sikret programmet at armeringen hadde tilstrekkelig forankring. Videre kunne dette også skyldes behovet for å oppfylle minimumskravene i EC2, som krevde visse minimumsverdier for armering uavhengig av beregnede nødvendige mengder.

LONGITUDINAL BAR DESIGN DETAILS:

Loc. (m)	Positive Moment					Negative Moment				
	Med (kNm)	Mrd (kNm)	As req. (mm ²)	As' req. (mm ²)	Asb prv. (mm ²)	Med (kNm)	Mrd (kNm)	As req. (mm ²)	As' req. (mm ²)	Ast prv. (mm ²)
0.000	0.0	150.9	0	0	982	0.0	-54.2	171	0	302
0.150	0.0	150.9	0	0	982	0.0	-54.2	171	0	302
0.450	39.4	150.9	239	0	982	0.0	-54.2	171	0	302
0.750	68.8	150.5	425	0	982	0.0	-24.6	0	0	215

Figur 92: Utklipp fra bjelkerapporten for basis modulær enhet som viser dimensjonerende krefter og kapasitet i snitt, samt nødvendig og designet armering.

4.4 Automatisering av 3D-armering i modellen

Det er kun RAM-Structural System som kan automatisere den genererte 3D-armeringen i modellen. Imidlertid kan man ikke se 3D-armeringen i modellen mens den fortsatt er i RAM Concrete designverktøyet. Modellen må overføres til en annen visualiseringsverktøy slik man kan se 3D-armeringen i modellen.

Ved bruk av iTwin tillot dette en overgang fra RAM-Structural System til visualiseringsplattformen hvor 3D-armeringen kunne inspiseres i detalj i modellen, og dette bekreftet beskrivelsen i kapittel 2.6.6. iTwin synkroniserte dataene, noe som viste mulighetene for automatisering av 3D armering i modellen ved å kombinere RAMs armeringsdesign med iTwins visualiseringsmuligheter. Hvis det derimot ble oppdaget feil og man måtte gjøre endringer i armeringsdesignet, måtte man gå tilbake til RAM Structural System for å endre dette, fordi iTwin ikke tillot å gjøre endringer på modellen. Dette kompliserte arbeidsflyten ved at det krevde flere trinn og manuell innsats for å sikre korrekt og oppdatert 3D armering i modellen. Den automatiske genererte 3D-armeringen i modellen kunne også tas videre inn i Revit for ytterligere bearbeiding og visualisering, noe som økte fleksibiliteten og anvendeligheten av designprosessen, men viste også svakhetene med automatiseringen.

For eksempel ble det i løpet av framgangsmåten for rammekonstruksjonen i kapittel 3.5.4.1.4 det identifisert flere feil knyttet til automatiseringen av 3D armeringen når modellen var importert i Revit (Tabell 17).

Tabell 17: Oppdagede feil vedrørende automatiseringen av 3D armering fra RAM-Structural System til Revit

Feil	Beskrivelse
Modellens totale høyde redusert	En reduksjon i totalhøyden av modellen
Endringer i tverrsnitt	Bjelkens tverrsnitt ble endret fra 450 * 500 mm til 300 * 600 mm
Feil i armeringsplassering	3D-armeringen for bjelken var feilplassert slik at den delvis stod ut av modellen.
Ingen sammenkobling	3D-armeringen hadde ingen sammenkoblinger
Feilvendte endeavslutninger av armering	Endeavslutningene til armeringen var feilvendt
Feil antall	Feil antall lengdearmering for den ene søylen

4.5 Integrasjonen med Revit

Begge programvarene er integrert med Revit på ulike måter. SOFiSTiK er fullt integrert i Revit, og denne integrasjonen er offisiell. Dette gjør at de to programvarene kommuniserer godt og

deler flere funksjoner, og informasjonsflyten mellom dem er sømløs. RAM Structural System derimot, integreres med Revit ved hjelp av tredjeparts integrasjonsverktøy og har ikke noe felles med Revit. Informasjonsflyten mellom Revit og RAM Structural System er basert på tredjepartsverktøyets evne og funksjonalitet. Mer om integrasjonen vil følge under drøftingskapittel.

4.6 Brukervennlighet

Ifølge (Ryvarden, 2005) handler brukervennlig om at et system skal være lett å lære, effektivt, lett å huske, håndtere feil på en god måte, samt at det skal være behagelig å bruke.

4.6.1 SOFiSTiK

SOFiSTiK er fullt integrert i Revit, og disse programvarene deler flere felles verktøy. Det viste seg at å bruke SOFiSTiK er like enkelt som å bruke Revit etter en kort periode med opplæring ved hjelp av SOFiSTiKs nettbaserte brukermanual. Brukermanualen viste seg å være brukervennlig. Imidlertid er SOFiSTiKs beregninger kodebaserte, og dette krever at man forstår noe matematikk og Python-koding for å kunne nyttiggjøre seg SOFiSTiK best mulig.

4.6.2 RAM-Structural System

Det viste seg at RAM-Structural System er en avansert programvare som består av flere moduler designet for å håndtere forskjellige oppgaver på en logisk og veiledende måte. Selv om visse trinn måtte følges i rekkefølge, tillot programmet noen justeringer i senere faser uten å måtte gå tilbake til tidligere verktøy. På grunn av programmets kompleksitet var det uansett et stort behov for opplæringsvideoer og brukermanualer. En hjelpeknapp var tilgjengelig i de fleste funksjonene og ga direkte tilgang til relevant seksjon i den omfattende brukermanualen, som var tilgjengelig lokalt på datamaskinen.

5 DRØFTING

I denne delen vil vi drøfte de viktigste funnene fra utforskningen av SOFiSTiK og RAM FEM-analyseprogrammer, med fokus på generering og automatisering av armeringsdesign og deres integrasjon med BIM-verktøyet Revit. Drøftingen baserer seg på den valgte metoden og Case-studiene som viser metodenes gyldighet, samt resultatene fra disse testene.

Formålet med denne drøftingen er å evaluere kjernefunnene fra SOFiSTiK og RAM Structural System i konteksten av de utvalgte Case-studiene som involverer analyse og design av armering i konstruksjonsmodeller.

Drøftingen vil dekke prosessen med generering av nødvendig armering, og om dette kan anses som 3D-armering, visualisering og integrasjon med Revit. Videre vil drøftingen systematisk gå gjennom hvert aspekt for hver programvare. Hver del av drøftingen vil bli fulgt av en oppsummering som inneholder en sammenligning av de to programvarene for det aktuelle aspektet.

5.1 Generering av nødvendig armering, og om det kan anses som 3D-armering

Begge programvarene har evnen til å generere armering basert på FEM-analyser for betongkonstruksjoner, med EC2 som beregningsgrunnlag. Spørsmålet er om den genererte armeringen kan anses som 3D-armering. En tredimensjonal gjenstand eller matematisk modell har tre dimensjoner, det vil si at gjenstanden har utstrekning i lengde, bredde og høyde (Rosvold, 2019). 3D-armeringsmodellering innebærer å lage en tredimensjonal digital representasjon av armeringselementene i en betongkonstruksjon, inkludert plassering, størrelse og orientering av armeringene i et nøyaktig virtuelt miljø (QeCAD, u.d.). Basert på disse beskrivelsene kan man si at begge programvarene genererer 3D-armering fordi designrapportene gir informasjon om plassering, størrelse og orientering av armeringene i et nøyaktig miljø: SOFiSTiK i matematisk modell/beskrivelse og RAM Structural System i virtuelt miljø og beskrivelse. Videre vil vi drøfte dette.

Bruken av EC2 varierer mellom de to programvarene. SOFiSTiK gir en fullstendig forklaring av de ulike seksjonene som ble benyttet som beregningsgrunnlag for designresultatene. Dette gjør det mulig å kontrollere eventuelle avvik i de gitte designresultatene. RAM Structural System, derimot, gir ikke en fullstendig beskrivelse av de seksjonene som ble brukt som beregningsgrunnlag for de gitte designresultatene, spesielt når det gjelder bjelker. Dette skaper usikkerhet hvis man finner noe tvilsomt i designresultatene. I tillegg viser RAM Structural System ikke om designresultatene er basert på ULS eller SLS retningslinjer, mens SOFiSTiK gir en tydelig og detaljert beskrivelse av dette.

5.1.1 SOFiSTiK

SOFiSTiK gir armeringsdesignresultatene på ulike måter. Når det gjelder for søyler viser programvaren resultatene i form av tegning. Imidlertid er det er noe uklarhet knyttet til den genererte armeringen når det gjelder plasseringen av armering i modellen. Lengdearmeringen for søylene vises i tegningsform, og det er gitt en begrunnelse i beregningsgrunnlaget for hvorfor de er plassert slik. Programvaren viser imidlertid ikke beregningsgrunnlaget, mengden, eller avstanden mellom skjærarmeringene for søylene. Det er heller ingen beskrivelse av

skjærarmeringen for søylene i programvaren. Det er opp til den ansvarlige ingeniøren å bestemme hva man skal basere seg på for å fastsette skjærarmeringen for søylene. I motsetning til dette viser programvarens armerings sjekker hva som faktisk er levert som skjærarmering for søylene. Det er uklart hvordan verktøyet kan identifisere plassert skjærarmering på søylene hvis programvaren ikke viser beregningsgrunnlaget eller den beregnede skjærarmeringen.

Når det gjelder beregnet armering for bjelken, gir SOFiSTiK-programvaren en detaljert forklaring i tabellform. Tabellene viser mengden av lengdearmeringen for både underkant og overkant, samt mengden og plasseringen eller avstanden mellom skjærarmeringene. Likevel er det fortsatt noen utfordringer når det gjelder plasseringen av lengdearmeringen både i underkant og overkant. Programvaren viser mengden armering for begge kantene, men den viser ikke type armering, senteravstanden mellom dem, eller lagarmering, hvis det er aktuelt. Da må man bruke tid på å beregne og bestemme fra programmets beregnede armeringer hvilken type/diameter, avstand mellom dem, og eventuell lagarmering som skal brukes. Dette medfører både fordeler og videre overveielser. For det første gir det fleksibilitet til å benytte alle mulige eller tilgjengelige armerings typer. Det betyr at hvis man ut fra erfaring mener det er bedre å bruke flere tynne stenger for armering av bjelken i stedet for tykke stenger, kan man for eksempel velge flere Ø16 i stedet for færre av en tykkere diameter. I tillegg varierer fordelingen av armering for bjelken når det gjelder ULS-basert beregnet lengdearmering. Derfor er det en stor fordel at verken type eller plassering av lengdearmeringen er fastsatt av programvaren. En erfaren ingeniør kan raskt bestemme hvor mye armering som er nødvendig og hvordan den bør plasseres, samtidig som den opprettholder belastningen som er analysert av programvaren. På den andre siden medfører det unødvendig tidsbruk at programvaren ikke angir den minste plasseringen og lagarmeringen av lengdearmeringen for begge kantene. Fra designrapportene ser man at den nødvendige armeringen for bjelken øker etter at programvaren utfører SLS-baserte beregninger. Den endelige beregnede armeringen for bjelken er den «Selected» armeringen vist i rapporttabellene. Fra designresultat-tabellene kan man se at selv om den nødvendige armeringen (Required) vises variert langs bjelken, har den valgte (Selected) armeringen samme verdimengde langs hele bjelken. Dette viser at til tross for variasjonen, bestemmer programmet at lengdearmeringen skal ha samme fordeling langs bjelken. I så fall ville det være tidssparende og mer nøyaktig om programvaren hadde muligheten til å bestemme plasseringen og lagarmeringen av lengdearmeringen for bjelken, på samme måte som for søylene.

Videre er om platetak og dekker. Basert på den genererte armeringsdesign for takplaten av basis modulær enheten, kan man si at SOFiSTiK-programvaren gir nok informasjon om plasseringen av både hovedarmeringen og fordelingsarmeringen for platetak og dekker. Når det gjelder platetak og dekker, gir programvaren omfattende informasjon som krever høynivå faglig forståelse samt tid og tålmodighet for å gjennomgå hele armeringsdesign-resultatrapporten. Omfanget i rapporten har både fordeler og unødvendige detaljer i noen tilfeller. Fordelen er at denne dokumentasjonen er nyttig for langtidsdokumentasjon, noe som er viktig for kvaliteten på BIM-modeller som lages i prosjekteringsfasen, og legger grunnlaget for hvilken nytte de har videre i drift og vedlikehold (STATSBYGG). Men for prosjektering som foregår i sanntid kan det være unødvendig å ha så mange detaljer, og tiden som brukes på å gjennomgå alle detaljene kan være bortkastet.

5.1.2 RAM Structural System

RAM Structural System gir armeringsdesignresultatene på ulike måter. Første ser man umiddelbart gjennom interaktivsteballene mens man holder designingen. Videre får man designrapport som viser detalj på designresultatene, og hvilke beregningsgrunnlag som ble benyttet for det endelige armeringsresultatet. Det viser imidlertid at det er en betydelig forskjell mellom søyler og bjelker når det gjelder detaljnivået som ble brukt for beregningsgrunnlaget av det endelige armeringsresultatet noe som er avgjørende for nøyaktigheten.

Interaktivtabell er verktøy for ingeniøren for å kunne se og endre det opprinnelige armeringsdesignet umiddelbart. For søyledesignet tillater denne tabellen manuelle endringer av armeringsdesignet ved å velge ulike armeringsmønstre som er definert tidligere. Ved opprettelse av armeringsmønstre er det mulig å definere grenser for diameteren til armeringen og hvor mange langsgående stenger søylene skal inneholde, noe som gjør at armeringsdesignet kan optimaliseres for ulike designkrav. Denne fleksibiliteten er viktig fordi den gir ingeniørene mulighet til å tilpasse designet til spesifikke krav og belastningsscenarier, noe som kan bidra til et mer effektivt og økonomisk design. Når de nye endringene er utført gjør programvaren nye kapasitetsberegninger for å verifisere om disse opprettholder EC2 sine krav og den dimensjonerende kapasiteten til søylene. Dette trinnet er avgjørende for å sikre at endringene ikke kompromitterer byggets strukturelle integritet og at de oppfyller alle relevante byggekoder.

Rapporten for søylearmeringsdesign er systematisk og lett å forstå og verifisere. Den gir en omfattende oversikt over søyleinformasjon, inkludert etasje, søylenummer og andre detaljer.

Dette gjør det enkelt å identifisere hver søyle i modellen. Rapporten spesifiserer også fysiske dimensjoner som dybde og bredde, som er avgjørende for videre beregninger.

Materialstyrke og egenskaper presenteres med presise verdier for betongstyrke (f_{ck}), armeringsstyrke (f_{yk}), vekt og elastisitetsmoduler. De forhåndsdefinerte egenskapene er tydelig inkludert i designprosessen, og det er tatt hensyn til dem under analyse og design.

RAM Structural System følger nøye EC2-regler for bruddgrensetilstander. Rapporten beskriver hvilke krefter som påvirker søylen både i positiv og negativ retning, samt aksialt og moment. Den viser også slankheten til søylen og inkluderer detaljerte beregninger av dette. På denne måten viser rapporten at RAM Structural System følger EC2 for dimensjonering av slanke konstruksjonsdeler. Kapitlene og seksjonene av EC2 som ble brukt som beregningsgrunnlag for hver del, er beskrevet i rapporten. Dette hjelper med å forstå designresultatene, og at de endelige armeringsresultatene er i samsvar med EC2, og verifisere eventuelle tvilsomme resultater.

RAM Structural System følger ikke EC2-regler for bruksgrensetilstander. Selv om det ikke er beskrevet i designrapporten, er det tydelig at RAM Structural System ikke følger SLS-reglene som beregningsgrunnlag, fordi ingen av seksjonene fra kapittel 7 av EC2, som er tilegnet bruksgrensekontroller, nevnes i designrapportene. Programvaren tar kun hensyn til ULS-tilstander. Dette kan føre til en betydelig mangel på overholdelse av lover og regler i forhold til bruk av EC2 i sin helhet i programvaren.

RAM Structural System viser en høy grad av nøyaktighet og detaljering i presentasjonen av søyledesignresultatene i samsvar med EC2 ULS-standardene. Dette viser at RAM Structural System kan brukes og gir pålitelige resultater som sikrer den strukturelle integriteten av konstruksjonen. Imidlertid er det mye usikkerhet rundt bruk av programvaren med hensyn til bruksgrensekontroller for søyler.

Også for bjelkene gis armeringsdesignet i en interaktivtabell. Dette gjør det mulig for ingeniøren å skreddersy armeringsdesignet til spesifikke belastningsforhold og strukturelle krav. Dette er viktig fordi det sikrer at bjelkene får den nødvendige styrken og holdbarheten uten overflødig materialbruk. Ved å bruke den tabellen for bjelkene kan ingeniøren justere parametere som antall, deres plassering og avstander, samt legge til ekstra armering der det er nødvendig. Dette gir en fleksibilitet til å tilpasse armeringsdesignet basert på spesifikke prosjektbehov og byggeplassforhold, og sikrer dermed at det endelige designet er nøyaktig og optimalisert.

Designrapporten for bjelke-armeringsdesign gir all mulige oversikt over bjelkeinformasjon, inkludert etasje, bjelkenummer og andre geometriske detaljer, informasjon om høyre og venstre støtte av bjelke osv. Dette gjør det enkelt å identifisere hver bjelke i modellen. Rapporten spesifiserer også fysiske dimensjoner som dybde og bredde, som er avgjørende for videre beregninger. Materialstyrke og egenskaper presenteres med presise verdier for betongstyrke (fck), armeringsstyrke (fyk), vekt og elastisitetsmoduler. De forhåndsdefinerte egenskapene er tydelig inkludert i designprosessen, og det verifiseres at det er tatt hensyn til dem under analyse og design.

Videre beskrives den designede armeringen på over- og underside med plassering og spesifikasjoner, inkludert størrelse, lagplassering og endeavslutninger. Dette gir en detaljert oversikt over hvordan bjelken er konstruert og hvilke materialer og dimensjoner som er brukt. Rapporten gir også en beskrivelse av dimensjonerende krefter og kapasitet både for positive og negative bøyemomenter, samt skjærkrefter, i tillegg til nødvendig og designet armering i ulike snitt i bjelkens lengde. For Case-studiene ble det vist at nødvendig armering varierte for de ulike snittene på grunn av varierende belastninger langs bjelken, mens den designede armeringen var den samme gjennom flere snitt. Dette viser optimalisering ved at programvaren forenkler armeringsprosessen ved å designe for praktisk bruk.

Designrapporten viser generelt bruk av EC2, men ikke eksplisitt til spesifikke kapitler eller seksjoner fra EC2 i beskrivelsen som beregningsgrunnlaget av det endelige armeringsresultatet. Dette indikerer at programvaren bruker standard retningslinjer fra EC2 uten å dokumentere de spesifikke seksjonene i resultatrapportene. Rapporten viser derfor heller ikke at programvaren tar hensyn til ULS og SLS, og dette kan resultere i at visse aspekter av strukturell ytelse under normale bruksforhold og ekstreme forhold ikke blir tilstrekkelig adressert. Dette kompliserer kontrolleringen og det er opp til ingeniøren til å forstå og akseptere eller verifisere om de armeringsresultatene er forsvarlige og brukbare.

Her oppstår det to viktige utfordringer med hensyn til videre og langtidsdokumentasjon og sikkerhet. For det første er det vanskelig å bruke dokumentet for langtidsdokumentasjon noe som er viktig for kvaliteten på BIM-modeller som lages i prosjekteringsfasen, og legger grunnlaget for hvilken nytte de har videre i drift og vedlikehold (STATSBYGG). For det andre er det stor usikkerhet om de armeringsresultatene er rimelige ettersom det er ikke kapittel eller seksjon som ble nevnt som beregningsgrunnlag fra EC2. Da må man ta ansvar og bruke tid til å verifisere de resultatene er riktige hvis det er noe tvilsomt i dem basert på erfaring og intuitivt.

Det er det imot effektivisering av designprosessen som tar mye tid til å verifisere resultatene er riktige. Det er også stor rom for menneskeligfeil hvis programvaren viser ikke nøyaktig hvilke kapittel eller seksjon som ble brukt for beregningsgrunnlag for det endelige armeringsresultater. Likevel kan det være også tidssparende og lett å bruke for prosjektering som foregår i sanntid for en mer erfart ingeniør.

5.1.3 Oppsummering og sammenligning av SOFiSTiK og RAM-Structural System

Tabell 18: Oppsummering og sammenligning av SOFiSTiK og RAM Structural System med tanke på generering av armeringen i forhold til nøyaktighet og bruk av EC2

Kjernepunkt	SOFiSTiK	RAM Structural System
Generering av 3D-armering	Ja, matematisk modell/beskrivelse	Ja, virtuelt miljø og beskrivelse
Bruk av EC2	Fullstendig forklaring av seksjoner brukt som beregningsgrunnlag	Ikke fullstendig forklaring av seksjoner brukt som beregningsgrunnlag
Designresultater for søyler	Tegningsform, noe uklarhet om plassering og skjærarmering	Interaktiv tabell, tillater manuelle endringer og optimalisering
Designresultater for bjelker	Detaljert tabellform, utfordringer med plassering og type armering	Interaktiv tabell, fleksibilitet i justeringer og optimalisering
Designresultater for platetak og dekker	Omfattende informasjon, både fordeler og unødvendige detaljer	Har ingen verktøy for platetak/dekker design
Nøyaktighet og detaljering	Nøyaktig med full forklaring, men kan være tidkrevende	Systematisk og lett å forstå, men mangler SLS detaljer. Det skaper usikkerhet rundt nøyaktighet.

Langtidsdokumentasjon	Nyttig for langtidsdokumentasjon (BIM-modeller)	Mangler spesifikke kapitler/seksjoner fra EC2, utfordrende for langtidsdokumentasjon
Samsvar med EC2 ULS-retningslinjer	Ja, med tydelig beskrivelse	Ja, men mangler beskrivelse av spesifikke kapitler/seksjoner
Samsvar med EC2 SLS-retningslinjer	Ja, med tydelig beskrivelse	Nei, tar kun hensyn til ULS-tilstander
Fleksibilitet i designjusteringer	Ingen automatiske justeringer	Tillater manuelle justeringer og optimalisering

5.2 Integrasjonen med BIM-verktøyet Revit

SOFiSTiK Analysis + Design er integrert i Revit. Integrasjonen er offisiell, og begge programvarene bruker flere felles verktøy. Denne integrasjonen gjør at informasjonsflyten mellom disse programvarene er sømløs. Enten programvarene bruker samme familietype bibliotek av materialer, eller integrasjonen gjør at den ene må lese den andres type materialer, oppstår det ingen problemer under analysen eller i designet. Tvert imot gir SOFiSTiK en feilmelding hvis et Revit-basert tverrsnitt av betongelementet ikke er kompatibelt med hensyn til modelleringskompatibilitet, og meldingen kan sjekkes og fikses umiddelbart. Dette kan effektivisere prosessen med armeringsdesign fordi tiden som brukes på eksportering frem og tilbake blir spart. I tillegg foregår modellering, analyse og armeringsdesign kun i Revit, og dette gir visualiseringsmuligheter som kan hjelpe ingeniøren med å se og rette opp eventuelle problemer i modellen. Imidlertid er det noen årsaker til at man bruker SOFiSTiK System Visualization, som ble introdusert i kapittel 2.7.1.2. Verktøyet, som er en del av SOFiSTiK Analysis + Design-pakken, lar ingeniører se hvordan konstruksjonen oppfører seg dynamisk under ulike typer belastning ved hjelp av løkker og animasjoner. Verktøyet åpnes fra Revit, men det er ikke fullt integrert i Revit. Siden verktøyet er nødvendig for å se konstruksjonens dynamiske oppførsel, men ikke er integrert direkte i Revit, er SOFiSTiK ikke fullstendig integrert i Revit.

RAM Structural System er også integrert med Revit, og integrasjonen er offisiell, men den skjer ved bruk av tredjepartsverktøyet iTwin. Informasjonsflyten mellom Revit og RAM Structural System er avhengig av iTwin-verktøyets evner og funksjonalitet. Basert på utforskningen med

case-studien av Rammekonstruksjonen, kan man si at iTwin-verktøyets evner og funksjonalitet ikke er tilfredsstillende. I tillegg ble det kjent fra utforskningen at Revit og RAM Structural System bruker ulike filtyper, noe som betyr at en direkte utveksling av filer mellom de to programmene ikke er mulig. Gjennom case-studien ble det bemerket at all data må konverteres via ISM Repository, noe som introduserer kompleksitet og krever ekstra trinn i arbeidsflyten.

Et eksempel som viste utfordringen med integrasjonen, var at Revit og RAM Structural System ikke kunne bruke samme bibliotek direkte. Revit-familier og RAM Structural Systems komponenter måtte opprettes og synkroniseres via ISM Repository, noe som medførte ekstra arbeid for å sikre at alle materialer og komponenter ble riktig definert og konsistente mellom systemene. Dette førte til økt kompleksitet i arbeidsflyten på grunn av de ekstra trinnene. Det var også viktig å manuelt sikre at dataene som ble overført mellom programmene, var korrekte. Dette inkluderte å sjekke endringer og konflikter som kunne oppstå under synkroniseringen, noe som krevde ekstra oppmerksomhet og forståelse av både RAM Structural System, Revit og iTwin. Disse utfordringene viste at integrasjonen mellom Revit og RAM Structural System ikke var uten problemer og kan kreve betydelig innsats for å oppnå nøyaktighet og konsistens i modellene. Her ser man to essensielle problemer som motvirker effektiviseringen av designarming ved bruk av Revit og RAM Structural System. For det første er tiden som brukes frem og tilbake gjennom iTwin enorm. For det andre skaper den manglende sømløsheten i informasjonsflyten flere muligheter for at analysen og designen ikke blir helt riktig, og man kan ikke være sikker på hva som mangler i prosessen frem og tilbake.

Tabellen under kan viser en oppsummering de kjernepunktene av integrasjonen de to programvarene med Revit.

Tabell 19: oppsummering og sammenligning av Integrasjon mellom SOFiSTiK og RAM Structural System med Revit

Tema	SOFiSTiK Analysis + Design	RAM Structural System
Integrasjonstype	Offisiell, direkte	Offisiell, via iTwin tredjepartsverktøy
Informasjonsflyt	Sømløs informasjonsflyt mellom programvarene	Avhengig av iTwin funksjonalitet, ikke alltid tilfredsstillende

Bibliotek og materialer	Felles bibliotek, sømløs kompatibilitet	Ulike filtyper, krever konvertering via ISM Repository
Sikkerhet og nøyaktighet i dataoverføring	Sikrer nøyaktighet ved direkte integrasjon.	Krever manuell sjekk av data, risiko for feil under synkronisering
Modellering og design	Foregår kun i Revit, med mulighet for visualisering	Krever manuell synkronisering og kontroll
Feilmeldinger og kompatibilitet	Gir umiddelbare feilmeldinger for inkompatible tverrsnitt	Kompleks arbeidsflyt, ekstra trinn for nøyaktighet
Kompleksitet og tidseffektivitet	Tid spart på eksportering, umiddelbar retting	Tidkrevende prosesser, muligheter for feil i informasjonsflyten

5.3 Visualisering

Visualisering er viktig i analyse og design av konstruksjoner fordi det gir en intuitiv forståelse av komplekse data og resultater. He og Ji (He & Ji, 2023) forklarer at visualisering fra flere perspektiver bidrar til å omdanne store mengder informasjon til brukbar kunnskap og innsikt. Dette hjelper operatører med å ta raske og presise beslutninger i ulike faser av produksjonsprosessen. Dette viser hvordan visualisering kan forbedre forståelsen og beslutningstakingen i konstruksjonsprosjekter.

I tillegg, ifølge Song et al. (Song, He, & Kuang, 2022), er visualiseringsteknologier avgjørende for å samle, klustre og presentere kunnskap visuelt. De påpeker at visualisering gir en helhetlig forståelse av forskningssituasjoner, viktige områder og trender innen brukeropplevelse. Dette viser hvordan visualisering gir en systematisk og omfattende forståelse av forskningskontekster.

Både SOFiSTiK og RAM Structural System visualiserer modellen, analyse- og designresultatene på forskjellige måter med varierende grad av klarhet. Den følgende kapittdelen vil drøfte over funnene av visualiseringsevnen til begge programvarene.

5.3.1 SOFiSTiK

SOFiSTiK visualiseringsverktøy gir en komplett fremstilling av de interne kreftene som påvirker hver konstruksjonsdel. Dette oppnås ved å vise kreftene i de ulike delene i en 3D-modell med numeriske verdier og dynamiske 3D-grafer som indikerer kreftenes størrelse på forskjellige punkter. Dette er spesielt nyttig for komplekse strukturer som bjelker (Figur 66) hvor interne krefter kan variere betydelig. På denne måten kan man få full forståelse av kreftene som påvirker konstruksjonen og omdanne store mengder informasjon til brukbar kunnskap og innsikt.

Visualiseringsverktøyet bruker også fargekoder for å indikere intensitetsnivået der dynamiske 3D-grafer eller numeriske verdier kan være uklare. For eksempel, på en takplate (Figur 67) som er bred og har stort areal, men som ikke er tykk, kan vi se intensitetsnivåer med fargekoder som endrer seg gradvis. Dette gir en klar oversikt over hvor kreftene er mest intense.

Armeringsresultatene visualiseres ved hjelp av detaljert dynamisk 3D-grafikk og fargekoder på modellen. Dette gir en klar forståelse av armeringsfordelingen, spesielt på skjærarmering av bjelker (Figur 68), som varierer langs bjelken, og takplater (Figur 69) som har overkant, underkant samt hoved- og fordelingsarmering. I tillegg visualiserer verktøyet armeringsresultatene hver for seg på overkant og underkant av bjelken.

Dette har flere fordeler. For det første gir det informasjon om mengden armering for hver konstruksjonsdel. Dette medfører at man kan plassere armeringene umiddelbart på modellen mens man bruker visualiseringsverktøyet. Når det gjelder søyler og plater/dekker, kan man sjekke og gjøre justeringer på armering ved bruk av verktøyets armering-sjekker Figur 71 i sanntid. Dette effektiviserer designprosessen og øker nøyaktigheten. For det andre hjelper det til å sammenligne armeringsresultatene med de påførte kreftene, og hjelper til å bekrefte at armeringen er tilstrekkelig.

Det er også noen utfordringer med verktøyet. Visualiseringsverktøyet viser de interne kreftene som oppstår i konstruksjonen for hvert enkelt lasttilfelle. Man kan bruke verktøyets valgknapp for å se påvirkningen av hvert lasttilfelle separat. Dette er viktig for å forstå påvirkningen av de permanente og variable lastene på konstruksjonen. Likevel er armeringsdesign-resultatene basert på den største lastkombinasjonen av alle lasttilfeller. Verktøyet har ikke mulighet til å vise virkningen av den avgjørende lastkombinasjonen, slik at man kan se, vurdere og

sammenligne påvirkningen av denne lastkombinasjonen med armeringsdesign-resultatene. Dette kunne gitt en klarere forståelse av situasjonen.

I tillegg er det en uklar teknisk utfordring med armerings-sjekkverktøyet når det gjelder både søyler og takplater/dekker. Designverktøyet gir ingen forklaring på den nødvendige skjærarmeringen for søyler, og resultatvisualiseringsverktøyet viser heller ikke mengden av nødvendig skjærarmering for søyler. Likevel viser armerings-sjekkverktøyet de leverte skjærarmeringene for søyler. Hvordan kunne verktøyet lese de leverte skjærarmeringene hvis den ikke gir informasjon i designrapporten eller viser designresultatene? Dette vekker usikkerhet om troverdigheten til hele designverktøyet. I tillegg kunne armerings-sjekkverktøyet ikke lese de leverte armeringene for takplaten eller gi feilmelding om dette, noe som vekker usikkerhet om designverktøyets virkemåte og troverdighet.

5.3.2 RAM Structural System

Visualiseringen av FEM-analyse resultatene i RAM-Structural System gjorde det mulig å se resultatene i 3D på modellen, noe som hjelper med å forstå strukturell oppførsel. For eksempel visualiseres bøyemoment og skjærkrefter representert gjennom både diagrammer og numeriske verdier på modellen, og det er muligheter for å velge om dette skal vises på den komplette eller den analytiske modellen. Denne typen visualisering er verdifull fordi den gir en intuitiv forståelse av hvor kreftene er størst og hvordan de distribueres gjennom strukturen. Imidlertid viste denne visualiseringen også sine begrensninger. Selv om den hjelper med å forstå kreftenes påvirkning, er den forenklet og fanger ikke opp alle nyanser i den strukturelle oppførselen. Et fargeplott kunne vises for takplaten i basis modulær enhet, hvor fargen ga et visuelt inntrykk av forskyvningene. Derimot var dette kun mulig for platen, og ikke søylene og bjelkene. Visualiseringen er begrenset til hvert lasttilfelle, og virkningen av kreftene for den største lastkombinasjonen som armeringsdesignet er basert på, er ikke mulig å vise. Dette kan føre til en overforenkling av komplekse fenomener, noe som potensielt kan påvirke forståelsen av konstruksjonsanalysen.

Når det gjelder visualiseringen av armeringsdesignet innenfor programvaren ble det avdekket utfordringer. Armeringsdesignet for bjelker vises for lengdearmering i underkant, overkant og for skjærarmering. Figur 89 viser hvordan lengdearmeringen i overkant visualiseres i 2D som linjer med antall og størrelse i tallverdi. Det er mulighet for å trykke på linjene for å få oppgitt detaljer om den totale lengden på armeringsjernene, men ytterligere informasjon mangler. Informasjon som senteravstand og plassering for de ulike armeringslagene er ikke vist i 2D

visningen, noe som bidrar til å gi et mangefult bilde. Skjærarmeringen er visualisert på lignende måte i et eget bilde, med linjer og tilhørende tallverdi for antall, størrelse og avstand mellom hver bøyel, men likevel gir dette en utydelig visning på hvordan skjærarmeringen fordeler seg i bjelken. Siden det ikke er mulig å visualisere lengdearmering og skjærarmering samtidig, blir det vanskelig å få en helhetlig forståelse av hvordan de ulike armeringene kompletterer hverandre innenfor strukturen. En 2D visning gir mindre mulighet til å se hvordan ulike elementer i en konstruksjon samhandler, noe som kan føre til at viktige detaljer overses eller misforstås. For søylene er det ikke mulighet for å visualisere armeringsdesignet overhode, og dette bekrefter at RAM-Structural System i seg selv har begrensede muligheter for visualisering. Ved å ikke gi mulighet for å se armeringen i 3D i modellen samtidig som endringer gjøres vil dette også begrense både effektivitet og nøyaktighet. I tillegg er det ikke mulig å se hvordan modellen oppfører seg under ulike laster, og uten denne muligheten er det vanskelig å vurdere strukturens dynamiske respons. En detaljert og klar visualisering gjør det lettere å forstå designet, redusere feil og sikre at modellen blir riktig. Brukere som ikke er vant med RAM-Structural System kan finne det utfordrende å navigere og forstå armeringsvisualiseringene, spesielt når disse ikke presenteres på en intuitiv måte.

Imidlertid har RAM-Structural System mulighet for å visualisere 3D armeringen i tredjeparts program. Dette tillater ingeniører å inspisere armeringsdetaljene i 3D, noe som gir en klar og detaljert fremstilling av hvordan armeringen er plassert i konstruksjonen. Dette er spesielt nyttig for å identifisere potensielle feil eller ineffektive armeringsmønstre som kan være vanskelige å oppdage i todimensjonale tegninger og beskrivelser. Dersom det oppdages feil derimot, må designet enten endres tilbake i RAM-Structural System eller så må det overføres til Revit for videre behandling noe som gjør prosessen mer komplisert. Dette er fordi iTwin er en programvare som brukes i forbindelse med integreringen av Revit og ikke tillater direkte redigering av armeringen, kun visualisering, kontrollering og overførsel av data. Dette gjør at man må veksle mellom flere programvarer hvis det må gjøres endringer og for å visualisere disse på nytt, noe som går påvirker effektiviteten.

5.3.3 Oppsummering og sammenligning av visualiseringen

Tabell 20: oppsummering og sammenligning av visualiseringen mellom SOFiSTiK og RAM Structural System

Tema	SOFiSTiK	RAM Structural System
Visualisering av FEM-analyse i 3D	3D-modell med numeriske verdier og dynamiske 3D-grafer.	3D-modell med numeriske verdier og diagrammer.
Detaljgrad i FEM-resultater	Høy detaljgrad med fargekoder og dynamiske grafer for klar visualisering av kreftenes intensitet.	Forenklet, fargeplott for forskyvninger i plate.
Sammensatt visualisering	Visualiserer lasttilfeller hver for seg, ikke lastkombinasjoner.	Visualiserer lasttilfeller hver for seg, ikke lastkombinasjoner.
Visualisering av lengdearmering i bjelke	3D-visualisering som viser armeringsfordelingen for overkant og underkant av bjelker.	2D-linjer med antall, lengde og størrelser i tallverdi for overkant og underkant av bjelker. 3D-armering i tredjepartsprogram
Visualisering av skjærarmering i bjelke	3D-visualisering som viser armeringens fordeling og variasjon langs bjelken.	2D-linjer med antall, størrelse og avstand i tallverdi. 3D-armering i tredjepartsprogram
Visualisering av armering i søyler	3D-visualisering av levert armering i armeringssjekk, ikke i visualisering av resultater.	Ikke mulig i programvaren, kun 3D-armering i tredjepartsprogram
Visualisering av armering i plater/dekker	3D-visualisering som viser fordeling, problemer med levert armering i armeringssjekk	Ikke mulighet for armeringsdesign for plater og dekker.

5.4 Metoden

Metoden vi benyttet i denne studien, en utforskende forskningstilnærming, har vært avgjørende for å adressere problemstillingen. På grunn av at vi er to personer i prosjektet og oppgaven var begrenset til to ulike FEM-analyseprogramvarer, valgte vi å dele disse programmene mellom oss. Ingen av oss hadde erfaring med FEM-programvarene fra før, så vi brukte mye tid på å lese brukermanualer, se læringsvideoer og anvende dem i praksis. Denne læringsprosessen var tidkrevende, men nødvendig for å kunne bruke programmene effektivt.

I oppgaven valgte vi å sammenligne FEM-analyse og armeringsdesign fra RAM-Structural System og SOFiSTiK ved hjelp av en basis modulær enhet. En utfordring her var å sikre konsistens i modelleringen og påføring av lastene siden de ble modellert i to ulike programvarer. Fordelen med denne tilnærmingen var at den ga oss en direkte sammenligning av de to programmene. Siden SOFiSTiK og Revit har en sømløs integrering, valgte vi en egen case for å teste integrasjonen mellom RAM-Structural System og Revit. Utfordringen med dette var at integrasjonen var avhengig av en tredjepartsprogramvare som vi måtte lære oss. En fordel var at vi fikk muligheten til å utforske arbeidsflyten mellom disse programvarene og hvordan de kan brukes sammen. For å validere beregningene gjort av SOFiSTiK opp mot håndberegninger, valgte vi en fritt opplagt bjelke. Den opprinnelige planen var også å bruke denne bjelken for å validere beregningene i RAM-Structural System. Vi møtte imidlertid utfordringer med denne tilnærmingen, da RAM-Structural System ikke kunne analysere en enkel bjelke på samme måte som SOFiSTiK. Dette førte til usikkerhet rundt nøyaktigheten av resultatene fra RAM-Structural System, da vi ikke kunne utføre en direkte sammenligning med håndberegninger.

Når det gjelder kildene vi brukte, var brukermanualer og læringsvideoer svært nyttige for å lære oss programmene. Brukermanualene ga oss en detaljert forståelse av funksjonene i hvert program, mens læringsvideoene hjalp oss med praktiske eksempler. En utfordring med å lese brukermanualer var det tekniske omfanget og begrepene som ble brukt. Det gikk mye tid på å finne ut hva ulike begreper betød, og om disse var relevante for oppgaven vår. Til tross for denne utfordringen var brukermanualene essensielle for å få en grundig forståelse av programmene, mens læringsvideoene viste praktiske anvendelser.

Gjennomføringen av prosjektet ga oss viktige innsikter i både styrkene og svakhetene ved den valgte metoden og programvarene. Samarbeidet og delingen av oppgaver mellom oss to gjorde det mulig å håndtere kompleksiteten og omfanget av prosjektet. Fordelen med å dele programvarene mellom oss var at vi kunne fokusere på å gå i dybden i de to, men dette gjorde også at vi fikk begrenset kunnskap om den programvaren som den andre personen hadde. Hvis det i tillegg oppsto problemer i forbindelse med den ene programvaren som krevde to personer, gikk det utover tiden som ble brukt på den andre programvaren. Vi hadde jevnlige møter, med en opptrapping når oppgaven nærmet seg fullføring. Metoden viste seg å være effektiv for å evaluere programvarene i praksis. Fordelingen av oppgaver mellom oss to var en fordel da vi kunne spesialisere oss på hver vår programvare. Samtidig krevde det mye koordinasjon og kommunikasjon for å sikre at vi oppnådde en helhetlig forståelse av resultatene.

6 KONKLUSJON OG VIDERE ARBEID

Hensikten med denne bacheloroppgaven var å utforske potensialet i FEM-analyse programvarene SOFiSTiK og RAM når det gjelder generering og automatisering av armeringsdesign, og deres integrasjon med BIM-verktøyet Revit, etter ønske fra oppdragsgiveren. Videre var det å undersøke om programvarenes potensial er i samsvar med Eurokode-2-reglene for dimensjonering av betongkonstruksjoner, og hvordan de kan bidra til å effektivisere armeringsdesignprosessen og øke nøyaktigheten i konstruksjonsprosjekter. Oppgaven delte problemstillingen i en hovedproblemstilling og en underproblemstilling for å få en omfattende innsikt i teknologiene.

For å utforske hovedproblemstillingen gjennomgikk vi brukermanualer for SOFiSTiK og RAM-Structural System for å bygge et solid teoretisk grunnlag. Dette ble gjort ved å gå gjennom utviklernes og eiernes forklaringer om programvarene, veiledningsvideoer fra dem, samt å studere brukermanualen. Deretter ble programmets funksjonalitet testet i praksis, som beskrevet i manualen, for å vurdere teoriens gyldighet.

Videre ble det gjennomført flere casestudier for å observere og analysere hvordan FEM-analyse og armeringsdesign utføres med de utvalgte FEM-programvarene, hvordan programvarene genererer 3D-armering, og hvordan de integreres med Revit. I tillegg så oppgaven på mulighetene for automatisering av den genererte 3D-armeringen i modellen. Resultatene fra disse casestudiene ble analysert for å vurdere programvarenes potensial med fokus på analysen, generering av armeringsdesign, automatisering av 3D-armering og integrasjon med Revit.

Funnene ble diskutert og vurdert i forhold til problemstillingen for å gi en dypere forståelse av potensialet og begrensningene.

De utvalgte casestudiene viser at begge programvarene kan generere 3D-armering for en betongkonstruksjon basert på FEM-analysen av konstruksjonen. Likevel er det kun SOFiSTiK som kan generere for en hel konstruksjon. RAM Structural System har ikke funksjonalitet for takplater og dekker. Når det gjelder automatisering av de genererte armeringene i modellen, er det kun RAM Structural System som har mulighet til dette. For å gjøre dette i Revit krever imidlertid det den komplekse arbeidsflyten med iTwin, noe som kan påvirke effektiviteten. Feilene som ble oppdaget var så betydelige at arbeidet som kreves for å rette opp disse går betydelig ut over effektiviteten. I SOFiSTiK må denne armeringen modelleres manuelt, noe som reduserer effektiviteten. På en annen side reduserer dette også risikoen for feil ved at man har mere kontroll når den modelleres manuelt.

Når det gjelder integreringen med BIM-verktøyet Revit, viste det seg at det kun er SOFiSTiK som har sikker integrasjon, og integrasjonen er vellykket. Dette medfører at informasjonsflyten mellom SOFiSTiK og Revit er sømløs. Integrasjonen mellom RAM Structural System og Revit er kompleks, tidskrevende og med stor risiko for tap av data gjennom integrasjonsprosessen.

Mens vi brukte casestudiene for å få svar på hovedproblemstillingen, benyttet vi også muligheten til å undersøke underproblemstillingen. For denne brukte vi parametere som inkluderte bruk av EC2 i sin helhet av de to programvarene, fleksibilitet ved bruk av programvarene og visualisering. Gjennom disse parameterne forsøkte vi å vurdere effektivitet, optimalisering og nøyaktighet. SOFiSTiK gir detaljert informasjon om armeringsdesignet og sikrer nøyaktig armeringsdesign ved å følge både ULS- og SLS-retningslinjer fra EC2. Selv om RAM-Structural System også viser detaljerte beskrivelser av armeringsdesignet og tillater manuelle justeringer for optimalisering, er mangelen på fullstendig beskrivelse av beregningsgrunnlaget og SLS-retningslinjer en betydelig begrensning.

På den andre problemstillingen kom vi til en to-delt konklusjon. Valg av programvare bør avhenge av målet. Det kan være nyttig og tidssparende å bruke RAM Structural System kun for å beregne mengden armering for søyler og bjelker. Imidlertid må detaljert analyse, inkludert ULS og SLS, utføres med en annen programvare. I tillegg er det usannsynlig at en betongkonstruksjon skal være uten betongplater/dekker, da må man bruke en annen programvare for å få armeringsresultatene for plater/dekker. Men hvis målet med arbeidet

inkluderer bruk av EC2 i sin helhet og langsiktig dokumentasjon, må man velge SOFiSTiK for det aktuelle prosjektet.

6.1 Videre arbeid

For nysgjerrighets skyld søkte vi om det er mulig å automatisere de design resultatene fra SOFiSTiK direkte på modellen. Vi fant ut at det er mulig ved å bruke en tredjepart Plug inn dynamo. Både Revit og SOFiSTiK har en offisiell integrerings mulighet for bruk av dynamo. Revit for å automatisere mange andre modellerings apparater og SOFiSTiK for automatisering av analyse og designprosessen. Innen i den prosess er det en stor spillemulighet for å automatisere designresultatet av 3D-armeringne på modellen som er i Revit fordi dynamo er et program som virker ved lage skripter, noe som ikke krever avanserte forståelse koding. RAM-Structural System har mulighet til å raskt generere armeringsmengde og programvaren har funksjoner for Material Takeoff. Ved bruk av alle Bentley sine programvarer, vil de kunne tilby tilstrekkelige funksjoner for effektiv og nøyaktig prosjektering alene uten bruk av Revit.

7 REFERANSER

- Anwar, N., & Najam, F. A. (2017). *Science Direct*. Hentet fra Biaxial bending: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/biaxial-bending>
- Astasoft. (2024). *Astasoft.com*. Hentet fra RAM structural system: <https://www.astasoft.com.my/products/ram-structural-system>
- Autodesk. (2024). *Analytical Model - Essential Skill*. Hentet fra Autodesk Revit 2024: <https://help.autodesk.com/view/RVT/2024/ENU/?guid=GUID-DB1B675D-23D7-48D2-B1CC-2930519A50F6>
- Autodesk. (2024). *BIM tools for structural engineers, detailers, and fabricators*. Hentet fra REVIT FOR STRUCTURAL ENGINEERING: <https://www.autodesk.com/products/revit/structural>
- Autodesk. (2024). *What you can do with Autodesk Revit*. Hentet fra Revit: <https://www.autodesk.com/products/revit/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>
- Bell, K. (2013). *An engineering approach to finite element analysis of linear structural mechanics problems*. Vigmostad & Bjørke AS.
- Bell, K., & Meyer, R. W. (2022, 10 11). *elementmetoden*. Hentet fra Store norske leksikon: <https://snl.no/elementmetoden>
- Bentley. (2023, 04). *Bentleysystems.service-now.com*. Hentet fra RAM Modeler Tutorial: https://bentleysystems.service-now.com/community?id=kb_article&sysparm_article=KB0117805
- Bentley. (2024). *Bentley.com*. Hentet fra RAM Elements: <https://www.bentley.com/software/ram-elements/>
- Bentley. (2024). *Bentley.com*. Hentet fra RAM concept: <https://www.bentley.com/software/ram-concept/>
- Bentley. (2024). *Bentley.com*. Hentet fra RAM Structural system: <https://www.bentley.com/software/ram-structural-system/>
- Bentley. (2024). *Bentley.com*. Hentet fra About us: <https://www.bentley.com/company/about-us/>
- Bentley. (2024, 04). *bentleysystems.service-now.com*. Hentet fra RAM Concrete analysis tutorial: https://bentleysystems.service-now.com/community?id=kb_article&sysparm_article=KB0117789
- Bentley. (2024, 04). *bentleysystems.service-now.com*. Hentet fra RAM Concrete beam tutorial: https://bentleysystems.service-now.com/community?id=kb_article&sysparm_article=KB0117785

- Bentley. (2024, 05). *Bentleysystems.service-now.com*. Hentet fra iTwin Analytical Synchronizer 2023: https://bentleysystems.service-now.com/community?id=kb_article&sysparm_article=KB0110783
- Bentley. (2024, 04). *Bentleysystems.service-now.com*. Hentet fra ISM Nodes into RAM Structural System: https://bentleysystems.service-now.com/community?id=kb_article&sysparm_article=KB0117017
- Bentley. (2024). *Bentleysystems.service-now.com*. Hentet fra RAM Modulus Overview: https://bentleysystems.service-now.com/community?id=kb_article_view&sysparm_article=KB0116326
- Bentley. (2024). *Communities.bentley.com*. Hentet fra RAM Concrete Column: <https://docs.bentley.com/LiveContent/web/RAM%20Structural%20System%20Help-v4/en/GUID-6BD67EB3-2F42-46FB-94DD-91330E41045E.html>
- Bentley. (2024). *docs.bentley.com*. Hentet fra Design All and View/Update: <https://docs.bentley.com/LiveContent/web/RAM%20Structural%20System%20Help-v4/en/GUID-AAFB6FC0-B59B-4AD5-A78D-8BFC38CE4239.html>
- Bentley. (2024). *docs.bentley.com*. Hentet fra To edit self-weight and self-mass criteria: <https://docs.bentley.com/LiveContent/web/RAM%20Structural%20System%20Help-v4/en/GUID-13EE1C48-20BB-4058-9F5A-DECFD9D3C7D6.html>
- Bentley. (2024). *Docs.bentley.com*. Hentet fra The RAM Manager: <https://docs.bentley.com/LiveContent/web/RAM%20Structural%20System%20Help-v4/en/GUID-31C17F8A-7370-4DD2-860F-742504BA678A1.html>
- Bentley. (2024). *Docs.bentley.com*. Hentet fra Introduction: <https://docs.bentley.com/LiveContent/web/RAM%20Structural%20System%20Help-v4/en/GUID-EE06E4E5-0164-413A-9519-DB5752C4850F.html>
- Bentley. (2024). *Docs.bentley.com*. Hentet fra Analyze: <https://docs.bentley.com/LiveContent/web/RAM%20Structural%20System%20Help-v4/en/GUID-BEDFFD12-C032-42E0-A84F-9FDAACD8EBB1.html>
- Bentley. (2024). *Docs.bentley.com*. Hentet fra Results - Finite Element Model Information: <https://docs.bentley.com/LiveContent/web/RAM%20Structural%20System%20Help-v4/en/GUID-D0237FDB-7FA1-4948-9E70-CCFEED2CB938.html>
- Bentley. (2024). *Docs.bentley.com*. Hentet fra Results - Vertical Reactions: https://docs.bentley.com/LiveContent/web/RAM%20Structural%20System%20Help-v4/en/PROCESS_RESULTS_VERTICAL_REACTIONS.html
- Bentley. (2024). *Docs.bentley.com*. Hentet fra Results - Member Forces: <https://docs.bentley.com/LiveContent/web/RAM%20Structural%20System%20Help-v4/en/GUID-749F0F97-AF06-486F-B192-45E9BD25407E.html>

- Bentley. (2024). *Docs.bentley.com*. Hentet fra Results - Displacements:
<https://docs.bentley.com/LiveContent/web/RAM%20Structural%20System%20Help-v4/en/GUID-9C491827-1030-4213-8F27-802C57132CEE.html>
- Bentley. (2024). *Docs.bentley.com*. Hentet fra Database Criteria:
<https://docs.bentley.com/LiveContent/web/RAM%20Structural%20System%20Help-v4/en/GUID-F050D6CD-4778-477F-9D45-B5205E06DF40.html>
- Bentley. (2024). *Docs.bentley.com*. Hentet fra RAM concrete beam reports:
<https://docs.bentley.com/LiveContent/web/RAM%20Structural%20System%20Help-v4/en/GUID-2055CCCA-2231-4C7F-BBE2-562A70C57E8E.html>
- Bentley. (2024). *Docs.bentley.com*. Hentet fra RAM Concrete Column Reports:
<https://docs.bentley.com/LiveContent/web/RAM%20Structural%20System%20Help-v4/en/GUID-B2773C4C-0C57-4923-B0B2-C48A01735F41.html>
- Bentley. (2024). *Docs.bentley.com*. Hentet fra Design All and View/Update:
<https://docs.bentley.com/LiveContent/web/RAM%20Structural%20System%20Help-v4/en/GUID-AAFB6FC0-B59B-4AD5-A78D-8BFC38CE4239.html>
- Bentley. (2024, 04). *ISM explained*. Hentet fra bentleysystems.service-now.com:
https://bentleysystems.service-now.com/community?id=kb_article&sysparm_article=KB0115361
- Bentley Structural. (2023, 06 01). *Youtube.com*. Hentet fra Pushing a RAM Structural System Model to iTwin Analytical Synchronizer (Local File Workflow):
<https://www.youtube.com/watch?v=5ZFEcaTzrRM>
- Braut, G. S. (2019, 05 14). *nøyaktighet*. Hentet fra Store norske leksikon:
<https://snl.no/n%C3%B8yaktighet>
- Ernst, L. (2023, 06 06). *Structuralbasics*. Hentet fra Load Combinations:
<https://www.structuralbasics.com/load-combinations/>
- Flint, S. (2009, 06 19). *A Conceptual Model of Software Engineering Research Approaches*. Hentet fra AEEE:
<https://ieeexplore.ieee.org/document/5076645/authors#authors>
- Grøn, Ø. (2023, 01 24). *optimalisere*. Hentet fra Store norske leksikon:
<https://snl.no/optimalisere>
- Gunnarsjaa, A. (2021, 08 09). *Snl*. Hentet fra Søyle: <https://snl.no/s%C3%B8yle>
- Haile, Z. T. (2023, 09 07). *Power Analysis and Exploratory Research*. Hentet fra Sage Journals: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/08903344231195625>
- He, X., & Ji, P. (2023). *Multiple-view Visualization Awareness Model and Measurement Method Construction: Based on Quantitative Analysis of Situation Awareness*. Hentet fra Accelerating Open Access Science in Human Factors Engineering and Human-Centered Computing: <https://openaccess.cms->

conferences.org/publications/book/978-1-958651-53-7/article/978-1-958651-53-7_83

Mosley, B., Bungey, J., & Hulse, R. (2012). *Reinforced Concrete Design to Eurocode 2*. PALGRAVE MACMILLAN.

Olav Olsen. (i.d.). *Olav Olsen*. Hentet fra Historien vår:
<https://www.olavolsen.no/no/om-oss/historien-var>

QeCAD. (u.d.). *The Transformative Impact Of 3D Rebar In Construction*. Hentet fra QeCAD: <https://www.qecad.com/cadblog/the-transformative-impact-of-3d-rebar-in-construction/>

Rognsaa, A. (2015). *Bacheloroppgaven*. Oslo: Universitetsforlaget AS.

Rosvold, K. A. (2019, 09 12). *tredimensjonal*. Hentet fra Store norske leksikon:
<https://snl.no/tredimensjonal>

Ryvarden, E. (2005, 10 06). *digi.no*. Hentet fra IT bransjen roter med brukervennlighet:
<https://www.digi.no/artikler/it-bransjen-roter-med-brukervennlighet/315833>

Skotny, Ł. (2019, 01 24). *Enterfea.com*. Hentet fra What are nodes and elements in finite element analysis: <https://enterfea.com/what-are-nodes-and-elements-in-finite-element-analysis/>

Snl. (2023, 02 02). *Snl*. Hentet fra Bjelke: <https://snl.no/bjelke>

SOFiSTiK. (2023, 04). *SOFiSTiK BIM Workflow for Buildings*. Hentet fra SOFiSTiK BIM Workflow for Buildings: <https://info2.sofistik.de/typ-recording-sofistik-bim-workflow-for-buildings/>

SOFiSTiK. (2023). *Start Analysis*. Hentet fra SOFiSTiK Analysis + Design 2023:
https://docs.sofistik.com/2023/en/analysis_and_design/cmdref/analysis/start.html

SOFiSTiK. (2024). *Analysis + Design for Revit*. Hentet fra Analysis + Design for Revit:
<https://www.sofistik.com/en/products/bim-cad/analysis-design-for-revit>

SOFiSTiK. (2024). *Beam Design*. Hentet fra SOFiSTiK Analysis + Design:
https://docs.sofistik.com/2024/en/analysis_and_design/cmdref/design/beam.html

SOFiSTiK. (2024). *Column Design*. Hentet fra SOFiSTiK Analysis + Design :
https://docs.sofistik.com/2024/en/analysis_and_design/cmdref/design/column.html

SOFiSTiK. (2024). *Rebar Check*. Hentet fra SOFiSTiK Analysis + Design 2024:
https://docs.sofistik.com/2024/en/analysis_and_design/index.html

SOFiSTiK. (2024). *Reinforced Concrete Building in Revit*. Hentet fra SOFiSTiK Tutorials 2024: <https://docs.sofistik.com/2024/en/tutorials/index.html#>

SOFiSTiK. (2024). *Show Results*. Hentet fra SOFiSTiK Analysis + Design 2024:
https://docs.sofistik.com/2024/en/analysis_and_design/cmdref/results/show.html

- SOFiSTiK. (2024). *Slab Design*. Hentet fra SOFiSTiK Analysis + Design:
https://docs.sofistik.com/2024/en/analysis_and_design/cmdref/design/slab.html
- SOFiSTiK. (2024). *SOFiSTiK Analytical Model Generator*. Hentet fra SOFiSTiK Analytical Model Generator:
https://docs.sofistik.com/2024/en/analytical_model_toolkit/index.html
- SOFiSTiK. (2024). *Software for your BIM workflow*. Hentet fra SOFiSTiK:
<https://www.sofistik.com/en/solutions/software-for-your-bim-workflow>
- SOFiSTiK. (2024). *Subsystem View*. Hentet fra SOFiSTiK Analysis + Design:
https://docs.sofistik.com/2024/en/analysis_and_design/cmdref/systems/subsystem_view.html
- SOFiSTiK. (2024). *User's Guide*. Hentet fra SOFiSTiK Reinforcement:
<https://docs.sofistik.com/2024/en/reinforcement/index.html>
- SOFiSTiK. (2024). *User's Guide*. Hentet fra SOFiSTiK Analysis + Design 2024:
https://docs.sofistik.com/2024/en/analysis_and_design/index.html
- Song, N., He, X., & Kuang, Y. (2022, 09 28). *Research hotspots and trends analysis of user experience: Knowledge maps visualization and theoretical framework construction*. Hentet fra Front. Psychol.:
<https://www.frontiersin.org/journals/psychology/articles/10.3389/fpsyg.2022.990663/full>
- Standard Norge. (2021). *Eurokode 2 Prosjektering av betongkonstruksjoner*. Oslo: Standard Norge.
- STATSBYGG. (u.d.). *Hva er BIM?* Hentet fra STATSBYGG:
<https://go.nanolearning.com/LessonViewer/?da=1961473&key=EvXxndoAgqhKVwWu&mode=1&du=10841782&lp=true>
- Stavropoulos, G., Krinidis, S., Ioannidis, D., Moustakas, K., & Tzovaras, D. (2014, 10 27-30). *A building performance evaluation & visualization system*. Hentet fra IEEE:
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7004342/authors#authors>
- Sørensen, S. I. (2013). *Betongkonstruksjoner Beregning og dimensjonering etter Eurocode 2*. Vigmostad & Bjørke AS.

VEDLEGG

A. Analyseresultat av fritt opplagt bjelke

- 0.** Analyse basis modulær enhet
 - 1. Armeringsdesign søyler
 - 2. Armeringsdesign takplate
 - 3. Armeringsdesign bjelker
 - 4. Armeringsresultat fritt opplagt bjelke
 - 5. Håndberegning nødvendig armering fritt opplagt bjelke
- B.** RAM-Structural System rapporter
- C.** KI Deklarasjon
- D.** Poster

