

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Janova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



Visokošolski program Gradbeništvo,
Konstrukcijska smer

Kandidat:

Sergej Bočko

Mejna nosilnost vijačenih stikov

Diplomska naloga št.: 305

Mentor:
prof. dr. Jože Korelc

Ljubljana, 23. 4. 2008

POPRAVKI

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **SERGEJ BOČKO** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:
»**MEJNA NOSILNOST VIJAČENIH STIKOV**«.

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske
separatoteke FGG.

Trbovlje, 13.03.08

IZJAVE O PREGLEDU NALOGE

Nalogo so si ogledali učitelji konstrukcijske smeri:

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.014.2:624.078(043.2)
Avtor:	Sergej Bočko
Mentor:	izr. prof. dr. Jože Korelc
Naslov:	Mejna nosilnost vijačenih stikov
Obseg in oprema:	131 str., 10 pregl., 237 sl., 44 en.
Ključne besede:	jeklene konstrukcije, vijačeni stiki, metoda končnih elementov

Izvleček

Diplomska naloga obravnava izračun mejne nosilnosti devetih primerov preklopnih vijačenih stikov, spojenih z navadnimi vijaki brez prednapenjanja. Primeri so izbrani tako, da je za vsak primer značilna drugačna vrsta porušitve pločevine. Prvi del računa pri vsakem primeru vijačenega stika obsega izračun vseh kontrol (najmanjši in največji razmiki vijakov in robne razdalje, kontrola bruto in neto prereza, strižna nosilnost vijakov, bočni pritiski, strižni iztrg) za preklopne vijačene stika v skladu s standardom EN 1993-1-8. Pri kontrolah nismo upoštevali materialnih varnostnih faktorjev, ker smo računali karakteristično vrednost mejne nosilnosti. V drugem delu računa pa je za vsak primer stika narejena še numerična analiza z računalniškim programom AceFEM, ki temelji na metodi končnih elementov in je namenjen reševanju multi-fizikalnih problemov. Pri tem je uporabljen idealiziran bilinearni elastično-plastični materialni model brez utrjevanja. Numerična analiza poteka na osnovi Newtonove iteracijske metode. Rezultat analize so količine (mejna sila F_u , Misesova napetost, plastična deformacija...) v odvisnosti od pomika u . Opazovali smo tudi potek napetosti in deformacij in način porušitve stika. Za vsakega izmed devetih primerov vijačenih stikov je narejenih osem analiz, pri katerih gre za spreminjanje različnih parametrov in opazovanje njihovega vpliva na rezultate. Uporabljene so različne gostote mreže končnih elementov, ravninsko deformacijsko (RDS) ali ravninsko napetostno stanje (RNS) in funkcija SmoothMesh, ki sestavi boljše mrežo končnih elementov, ki se bolj prilega geometriji pločevine.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 624.014.2:624.078(043.2)
Author: Sergej Bočko
Supervisor: assoc. prof. dr. Jože Korelc
Title: Limit Load of Bolted Connections
Notes: 131 p., 10 tab., 237 fig., 44 eq.
Key words: steel structures, bolted connections, finite element method

Abstract

The present work focuses on definition of limit resistance of nine examples of bolted connections, which are connected with regular bolts without prestressing. We chose these examples in a way, that every example has a different way structural collision. First part of the calculation procedure contains design controls that are required for bolted connections according to EN 1993-1-8. According to results of all design controls, we defined the limit resistance for all examples. In the second part of the calculation procedure we made numerical analysis for every example of bolted connections. We did that with the computer program AceFEM, which is based on finite element method, and it is designed to solve multi-physic problems. We used the bilinear elastic-plastic material model without hardening. Numerical analysis is based on Newton iteration method and gives us results(limit force F_u , Misses stress, accumulated plastic deformation...) in dependence of displacement u . We also observed the course of stress and strains during the analysis and at the end. We made eight versions of analysis for every example in which we changed different parameters and observed their influence on results. We used different density of finite element mesh, plane stress (PS), plane strain (PE) and function SmoothMesh that creates better mesh of finite elements.

ZAHVALA

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Jožetu Korelcu. Zahvalil bi se tudi mlademu raziskovalcu Niku Kristaniču za pomoč pri programu AceFEM.

Zahvaljujem se tudi svojim staršema, ker sta me vsa leta študija vzpodbujala in mi stala ob strani.

KAZALO VSEBINE

1 UVOD	1
2 JEKLO	3
2.1 Mehanske lastnosti jekla	3
2.2 Idealiziran bilinearni elastično-plastični materialni model	5
2.3 Von-Misesov pogoj tečenja	5
2.4 Posplošeni Hookov zakon	7
2.4.1 Ravninsko napetostno stanje (RNS)	7
2.4.2 Ravninsko deformacijsko stanje (RDS)	8
3 PROJEKTIRANJE VIJAČENIH STIKOV	9
3.1 Splošno	9
3.2 Razpored lukenj za vijake	9
3.3 Projektna nosilnost posameznih veznih sredstev (EN 1993-1-8, 3.6)	11
3.4 Strižni iztrg	15
3.5 Nosilnost prečnih prerezov (EN 1993-1-1, 6.2)	16
3.5.1 Lastnosti prečnega prereza	16
3.5.1.1 Bruto prečni prerez	16
3.5.1.2 Neto prečni prerez	16
3.5.2 Nateg	17
3.5.3 Tlak	18
3.5.4 Upogibni moment	18
3.5.5 Strig	19
3.5.6 Upogib in strig	22
3.6 Razporeditev sil med vijaki	23
3.6.1 Kratki stiki	23
3.6.2 Dolgi stiki	23
4 PROGRAM AceFEM	25
4.1 Splošno	25

4.2 Metoda končnih elementov	25
5 DOLOČITEV MEJNE NOSILNOSTI VIJAČENEGA STIKA	28
5.1 Splošno	28
5.2 RNS/RDS	29
5.3 Analiza s programom AceFEM	29
6 REZULTATI	32
6.1 Primer 1-en vijak (nateg)	32
6.1.1 Geometrija pločevine	32
6.1.2 Račun nosilnosti po EN 1993-1-8	33
6.1.3 Analiza s programom AceFEM	34
6.1.3.1 Varianta A	35
6.1.4 Mejne sile	39
6.2 Primer 2-en vijak (nateg)	41
6.2.1 Geometrija pločevine	41
6.2.2 Račun nosilnosti po EN 1993-1-8	42
6.2.3 Analiza s programom AceFEM	43
6.2.3.1 Varianta B	44
6.2.4 Mejne sile	48
6.3 Primer 3-trije vijaki (strig)	50
6.3.1 Geometrija pločevine	50
6.3.2 Račun nosilnosti po EN 1993-1-8	51
6.3.3 Analiza s programom AceFEM	53
6.3.3.1 Varianta C	54
6.3.4 Mejne sile	59
6.4 Primer 4-trije vijaki (strig)	60
6.4.1 Geometrija pločevine	60
6.4.2 Račun nosilnosti po EN 1993-1-8	61
6.4.3 Analiza s programom AceFEM	63
6.4.3.1 Varianta D	64
6.4.4 Mejne sile	69

6.5 Primer 5-štirje vijaki (nateg)	70
6.5.1 Geometrija pločevine	70
6.5.2 Račun nosilnosti po EN 1993-1-8	71
6.5.3 Analiza s programom AceFEM	73
6.5.3.1 Varianta G	74
6.5.4 Mejne sile	78
6.6 Primer 6-osem vijakov (nateg)	79
6.6.1 Geometrija pločevine	79
6.6.2 Račun nosilnosti po EN 1993-1-8	80
6.6.3 Analiza s programom AceFEM	82
6.6.3.1 Varianta H	83
6.6.4 Mejne sile	88
6.7 Primer 7-dvanajst vijakov (nateg)	89
6.7.1 Geometrija pločevine	89
6.7.2 Račun nosilnosti po EN 1993-1-8	90
6.7.3 Analiza s programom AceFEM	92
6.7.3.1 Varianta G	93
6.7.4 Mejne sile	98
6.8 Primer 8-šestnajst vijakov (nateg)	99
6.8.1 Geometrija pločevine	99
6.8.2 Račun nosilnosti po EN 1993-1-8	100
6.8.3 Analiza s programom AceFEM	102
6.8.3.1 Varianta G	103
6.8.4 Mejne sile	111
6.9 Primer 9-dvaintrideset vijakov (nateg)	112
6.9.1 Geometrija pločevine	112
6.9.2 Račun nosilnosti po EN 1993-1-8	113
6.9.3 Analiza s programom AceFEM	115
6.9.3.1 Varianta D	116
6.9.4 Mejne sile	127
6.10 Poročilo numerične analize	128

7 ZAKLJUČEK **129**

VIRI **131**

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Mejne sile F_u	39
Preglednica 2: Mejne sile F_u	48
Preglednica 3: Mejne sile F_u	59
Preglednica 4: Mejne sile F_u	69
Preglednica 5: Mejne sile F_u	78
Preglednica 6: Mejne sile F_u	88
Preglednica 7: Mejne sile F_u	98
Preglednica 8: Mejne sile F_u	111
Preglednica 9: Mejne sile F_u	127
Preglednica 10: Poročilo numerične analize za zahtevnejše primere	128

KAZALO SLIK

Slika 1: Preklopni vijačeni stik	1
Slika 2: Čelni vijačeni stik	1
Slika 3: Diagram odvisnosti σ - ε pri nateznem preizkusu palice konstantnega prereza	3
Slika 4: Lokalna kontrakcija	4
Slika 5: Idealiziran bilinearni diagram σ - ε	5
Slika 6: Prostorsko napetostno stanje	6
Slika 7: Najmanjši in največji razmiki in robne razdalje (Preglednica 3.3 v EN 1993-1-8, str.24)	10
Slika 8: Oznake za robne razdalje in razmike veznih sredstev	11
Slika 9: Projektna nosilnost posameznih veznih sredstev pri strižni in/ali natezni obremenitvi (Preglednica 3.4 v EN 1993-1-8, str.28)	14
Slika 10: Strižni iztrg	15
Slika 11: Zamaknjene luknje in kritični črti pretrga 1 in 2	17
Slika 12: Razpored sil med vijaki pri kratkih stikih	23
Slika 13: Dolgi stiki	24
Slika 14: Razdelitev konstrukcije na končne elemente	26
Slika 15: Primeri stikov in poružitve	28
Slika 16: Numerični model stika	30
Slika 17: Variante numeričnih modelov	31
Slika 18: Skica primera 1	32
Slika 19: Geometrija pločevine primera 1	32
Slika 20: Točke in prerezi za primer 1	34
Slika 21: Sila-pomik	35
Slika 22: Misesova napetost po stiku	35
Slika 23: Misesova napetost po pločevini	36
Slika 24: Napetost σ_{yy} po pločevini	36
Slika 25: Misesova napetost in plastična deformacija v točkah T1, T2 in T3	37
Slika 26: σ_{yy} po prerezu 1	37

Slika 27: σ_{yy} po prerezu 2	37
Slika 28: σ_{yy} po prerezu 3	37
Slika 29: σ_{yy} po prerezu 4	37
Slika 30: σ_{yy} po prerezu 5	38
Slika 31: σ_{yy} po prerezu 6	38
Slika 32: Misesova napetost po prerezu 1	38
Slika 33: Misesova napetost po prerezu 2	38
Slika 34: Misesova napetost po prerezu 3	38
Slika 35: Misesova napetost po prerezu 4	38
Slika 36: Misesova napetost po prerezu 5	39
Slika 37: Misesova napetost po prerezu 6	39
Slika 38: Skica primera 2	41
Slika 39: Geometrija pločevine primera 2	41
Slika 40: Točke in prerezi za primer 2	43
Slika 41: Sila-pomik	44
Slika 42: Misesova napetost po stiku	44
Slika 43: Misesova napetost po pločevini	45
Slika 44: Napetost σ_{yy} po pločevini	45
Slika 45: Misesova napetost in plastična deformacija v točkah T1, T2 in T3	46
Slika 46: σ_{yy} po prerezu 1	46
Slika 47: σ_{yy} po prerezu 2	46
Slika 48: σ_{yy} po prerezu 3	46
Slika 49: σ_{yy} po prerezu 4	46
Slika 50: σ_{yy} po prerezu 5	47
Slika 51: σ_{yy} po prerezu 6	47
Slika 52: Misesova napetost po prerezu 1	47
Slika 53: Misesova napetost po prerezu 2	47
Slika 54: Misesova napetost po prerezu 3	47
Slika 55: Misesova napetost po prerezu 4	47

Slika 56: Misesova napetost po prerezu 5	48
Slika 57: Misesova napetost po prerezu 6	48
Slika 58: Skica primera 3	50
Slika 59: Geometrija pločevine primera 3	50
Slika 60: Točke in prerezi za primer 3	53
Slika 61: Sila-pomik	54
Slika 62: Misesova napetost po stiku	54
Slika 63: Misesova napetost po pločevini	55
Slika 64: Napetost σ_{yy} po pločevini	55
Slika 65: Misesova napetost in plastična deformacija v točkah T1, T2 in T3	56
Slika 66: σ_{yy} po prerezu 1	56
Slika 67: σ_{yy} po prerezu 2	56
Slika 68: σ_{yy} po prerezu 3	56
Slika 69: σ_{yy} po prerezu 4	56
Slika 70: Misesova napetost po prerezu 1	57
Slika 71: Misesova napetost po prerezu 2	57
Slika 72: Misesova napetost po prerezu 3	57
Slika 73: Misesova napetost po prerezu 4	57
Slika 74: σ_{yy} po prerezu 5	57
Slika 75: σ_{xx} po prerezu 5	57
Slika 76: Misesova napetost po prerezu 5	58
Slika 77: σ_{xy} po prerezu 5	58
Slika 78: Sile v vijakih V1, V2, V3	58
Slika 79: Skica primera 4	60
Slika 80: Geometrija pločevine primera 4	60
Slika 81: Točke in prerezi za primer 4	63
Slika 82: Sila-pomik	64
Slika 83: Misesova napetost po stiku	64
Slika 84: Misesova napetost po pločevini	65

Slika 85: Napetost σ_{yy} po pločevini	65
Slika 86: Misesova napetost in plastična deformacija v točkah T1, T2 in T3	66
Slika 87: σ_{yy} po prerezu 1	66
Slika 88: σ_{yy} po prerezu 2	66
Slika 89: σ_{yy} po prerezu 3	66
Slika 90: σ_{yy} po prerezu 4	66
Slika 91: Misesova napetost po prerezu 1	67
Slika 92: Misesova napetost po prerezu 2	67
Slika 93: Misesova napetost po prerezu 3	67
Slika 94: Misesova napetost po prerezu 4	67
Slika 95: σ_{yy} po prerezu 5	67
Slika 96: σ_{xx} po prerezu 5	67
Slika 97: Misesova napetost po prerezu 5	68
Slika 98: σ_{xy} po prerezu 5	68
Slika 99: Sile v vijakih V1,V2,V3	68
Slika 100: Skica primera 5	70
Slika 101: Geometrija pločevine primera 5	70
Slika 102: Točke in prerezi za primer 5	73
Slika 103: Sila-pomik	74
Slika 104: Misesova napetost po stiku	74
Slika 105: Misesova napetost po pločevini	75
Slika 106: Napetost σ_{yy} po pločevini	75
Slika 107: Misesova napetost in plastična deformacija v točkah T1, T2, T3 in T4	76
Slika 108: σ_{yy} po prerezu 1	76
Slika 109: σ_{yy} po prerezu 2	76
Slika 110: σ_{yy} po prerezu 3	76
Slika 111: σ_{yy} po prerezu 4	76
Slika 112: Misesova napetost po prerezu 1	77

Slika 113: Misesova napetost po prerezu 2	77
Slika 114: Misesova napetost po prerezu 3	77
Slika 115: Misesova napetost po prerezu 4	77
Slika 116: Sile v vijakih V1 in V3	77
Slika 117: Sile v vijakih V2 in V4	77
Slika 118: Skica primera 6	79
Slika 119: Geometrija pločevine primera 6	79
Slika 120: Prerezi za primer 6	82
Slika 121: Sila-pomik	83
Slika 122: Misesova napetost po stiku	83
Slika 123: Misesova napetost po pločevini	84
Slika 124: Napetost σ_{yy} po pločevini	84
Slika 125: σ_{yy} po prerezu 1	85
Slika 126: σ_{yy} po prerezu 2	85
Slika 127: σ_{yy} po prerezu 3	85
Slika 128: σ_{yy} po prerezu 4	85
Slika 129: σ_{yy} po prerezu 5	85
Slika 130: σ_{yy} po prerezu 6	85
Slika 131: Misesova napetost po prerezu 1	86
Slika 132: Misesova napetost po prerezu 2	86
Slika 133: Misesova napetost po prerezu 3	86
Slika 134: Misesova napetost po prerezu 4	86
Slika 135: Misesova napetost po prerezu 5	86
Slika 136: Misesova napetost po prerezu 6	86
Slika 137: Sile v vijakih V1, V3, V5 in V7	87
Slika 138: Sile v vijakih V2, V4, V6 in V8	87
Slika 139: Skica primera 7	89
Slika 140: Geometrija pločevine primera 7	89
Slika 141: Prerezi za primer 7	92
Slika 142: Sila-pomik	93

Slika 143: Misesova napetost po stiku	93
Slika 144: Misesova napetost po pločevini	94
Slika 145: Napetost σ_{yy} po pločevini	94
Slika 146: σ_{yy} po prerezu 1	95
Slika 147: σ_{yy} po prerezu 2	95
Slika 148: σ_{yy} po prerezu 3	95
Slika 149: σ_{yy} po prerezu 4	95
Slika 150: σ_{yy} po prerezu 5	95
Slika 151: σ_{yy} po prerezu 6	95
Slika 152: σ_{yy} po prerezu 7	96
Slika 153: Misesova napetost po prerezu 1	96
Slika 154: Misesova napetost po prerezu 2	96
Slika 155: Misesova napetost po prerezu 3	96
Slika 156: Misesova napetost po prerezu 4	96
Slika 157: Misesova napetost po prerezu 5	96
Slika 158: Misesova napetost po prerezu 6	97
Slika 159: Misesova napetost po prerezu 7	97
Slika 160: Sile v vijakih V1, V3, V5 in V7	97
Slika 161: Sile v vijakih V2, V4, V6 in V8	97
Slika 162: Sile v vijakih V9, V10, V11 in V12	97
Slika 163: Skica primera 8	99
Slika 164: Geometrija pločevine primera 8	99
Slika 165: Prerezi za primer 8	102
Slika 166: Sila-pomik	103
Slika 167: Misesova napetost po stiku	103
Slika 168: Misesova napetost po pločevini	104
Slika 169: Napetost σ_{yy} po pločevini	104
Slika 170: σ_{yy} po prerezu 1	105
Slika 171: σ_{yy} po prerezu 2	105

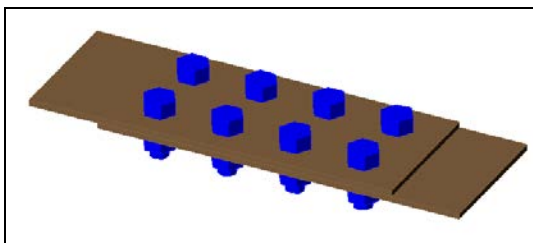
Slika 172: σ_{yy} po prerezu 3	105
Slika 173: σ_{yy} po prerezu 4	105
Slika 174: σ_{yy} po prerezu 5	105
Slika 175: σ_{yy} po prerezu 6	105
Slika 176: σ_{yy} po prerezu 7	106
Slika 177: σ_{yy} po prerezu 8	106
Slika 178: σ_{yy} po prerezu 9	106
Slika 179: σ_{yy} po prerezu 10	107
Slika 180: Misesova napetost po prerezu 1	107
Slika 181: Misesova napetost po prerezu 2	107
Slika 182: Misesova napetost po prerezu 3	108
Slika 183: Misesova napetost po prerezu 4	108
Slika 184: Misesova napetost po prerezu 5	108
Slika 185: Misesova napetost po prerezu 6	108
Slika 186: Misesova napetost po prerezu 7	108
Slika 187: Misesova napetost po prerezu 8	108
Slika 188: Misesova napetost po prerezu 9	109
Slika 189: Misesova napetost po prerezu 10	109
Slika 190: Sile v vijakih V1, V3, V5, V7, V9, V11, V13 in V15	110
Slika 191: Sile v vijakih V2, V4, V6, V8, V10, V12, V14 in V16	110
Slika 192: Skica primera 9	112
Slika 193: Geometrija pločevine primera 9	112
Slika 194: Prerezi za primer 9	115
Slika 195: Sila-pomik	116
Slika 196: Misesova napetost po stiku	116
Slika 197: Napetost σ_{yy} po pločevini	117
Slika 198: Misesova napetost po pločevini	117
Slika 199: Misesova napetost po stiku	117
Slika 200: σ_{yy} po prerezu 1	118

Slika 201: σ_{yy} po prerezu 2	118
Slika 202: σ_{yy} po prerezu 3	118
Slika 203: σ_{yy} po prerezu 4	118
Slika 204: σ_{yy} po prerezu 5	118
Slika 205: σ_{yy} po prerezu 6	118
Slika 206: σ_{yy} po prerezu 7	119
Slika 207: σ_{yy} po prerezu 8	119
Slika 208: σ_{yy} po prerezu 9	119
Slika 209: σ_{yy} po prerezu 10	119
Slika 210: σ_{yy} po prerezu 11	119
Slika 211: σ_{yy} po prerezu 12	119
Slika 212: σ_{yy} po prerezu 13	120
Slika 213: σ_{yy} po prerezu 14	120
Slika 214: σ_{yy} po prerezu 15	120
Slika 215: σ_{yy} po prerezu 16	120
Slika 216: σ_{yy} po prerezu 17	121
Slika 217: σ_{yy} po prerezu 18	121
Slika 218: Misesova napetost po prerezu 1	122
Slika 219: Misesova napetost po prerezu 2	122
Slika 220: Misesova napetost po prerezu 3	122
Slika 221: Misesova napetost po prerezu 4	122
Slika 222: Misesova napetost po prerezu 5	122
Slika 223: Misesova napetost po prerezu 6	122
Slika 224: Misesova napetost po prerezu 7	123
Slika 225: Misesova napetost po prerezu 8	123
Slika 226: Misesova napetost po prerezu 9	123
Slika 227: Misesova napetost po prerezu 10	123

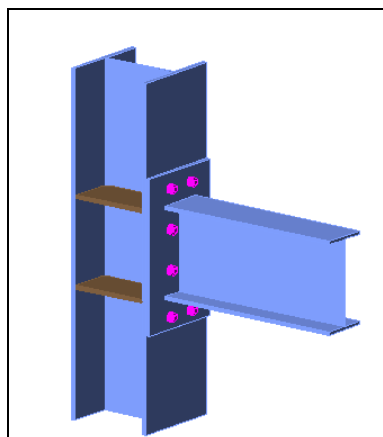
Slika 228: Misesova napetost po prerezu 11	123
Slika 229: Misesova napetost po prerezu 12	123
Slika 230: Misesova napetost po prerezu 13	124
Slika 231: Misesova napetost po prerezu 14	124
Slika 232: Misesova napetost po prerezu 15	124
Slika 233: Misesova napetost po prerezu 16	124
Slika 234: Misesova napetost po prerezu 17	125
Slika 235: Misesova napetost po prerezu 18	125
Slika 236: Sile v vijakih po prerezu 17	126
Slika 237: Sile v vijakih po prerezu 18	126

1 UVOD

Stiki predstavljajo najdražji element jeklene konstrukcije, zato morajo biti jeklene konstrukcije projektirane racionalno (čim manj stikov). V glavnem delimo vijačene stike po funkciji na preklopne in čelne stike. Pri preklopnih stikih (slika 1) predstavlja glavno obremenitev strig, ki jo prevzamejo vezna sredstva. Pri čelnih stikih (slika 2) nateg in strig prevzamejo vezna sredstva, tlak pa se prevzame z naleganjem pločevin.



Slika 1: Preklopni vijačeni stik



Slika 2: Čelni vijačeni stik

Pri projektiranju stikov moramo zagotoviti, da njihova nosilnost zagotavlja normalno delovanje konstrukcije, ter da izpolnjujejo vse osnovne zahteve v zvezi s projektiranjem v skladu s standardom Evrokod 3:Projektiranje jeklenih konstrukcij 1-8.del: Projektiranje spojev. Nosilnost stikov določimo na osnovi nosilnosti posameznih veznih sredstev stika. Za računanje stikov v splošnem uporabljamo linearno elastično analizo. Nelinearno analizo stikov lahko uporabimo pod pogojem, da upoštevamo značilne lastnosti diagramov obtežba-deformacija vseh sestavnih delov stika. Pri projektiranju stikov je potrebno zagotoviti, da so notranje sile in momenti v ravnotežju z zunanjimi silami in momenti, ter da je vsak element v stiku sposoben prevzeti del obtežbe, ki glede na računski model odpade nanj. Predpostavljeni razpored notranjih sil in momentov mora biti v skladu z razmerjem togosti posameznih sestavnih delov stika. Notranje sile se bodo skozi stik prenašale v razmerju togosti posameznih delov. Razporeditev notranjih sil je potrebno enolično določiti in jo upoštevati v vseh korakih dimenzioniranja. Deformacije elementov stika, ki so posledica predpostavljene

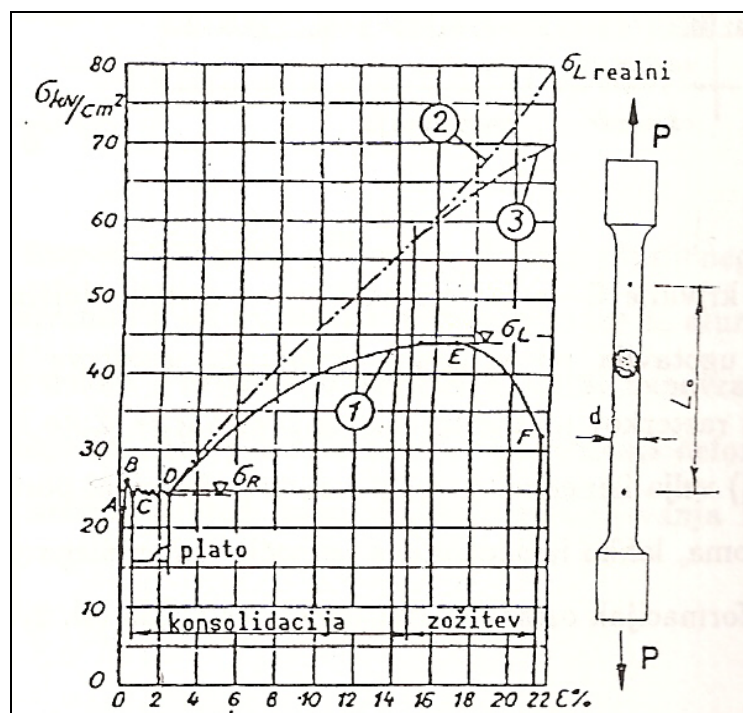
razporeditve notranjih sil in momentov v stiku, ne smejo presegati dejanskih sposobnosti deformiranja elementov stika.

Diplomska naloga obravnava vijaaene preklopne stike, spojene z navadnimi vijaki brez prednapenjanja. Pri projektiranju tovrstnih stikov, je potrebno najprej doloiti notranje sile stika. Obremenitev na stik razdelimo na zaplate v razmerju togosti. Nato izraunamo število vijakov, ki je odvisno od strižne odpornosti enega vijaka in od števila strižnih ravnin v stiku. Pri razporeditvi vijakov je potrebno upoštevati minimalne in maksimalne odmike, ki upoštevajo nosilnost na bočni pritisk, iztrg vijaka iz pločevine in neodvisnost delovanja vijakov. Kontrolirati je potrebno dolžino stika, ker pri dolgih stikih dobimo nižjo nosilnost na sredini pločevine, zaradi njene deformabilnosti. Preverimo še nosilnost bruto in neto prereza vezne pločevine in elementov, ki jih stikamo. Na koncu preverimo še nosilnost pločevin na bočni pritisk, ki je odvisna od premera vijakov, števila vijakov, debeline pločevin in razmikov med vijaki. Če je stik obremenjen strižno, je potrebna tudi kontrola nevarnosti strižnega pretrga ob robu pločevine (block shear).

2 JEKLO

2.1 Mehanske lastnosti jekla

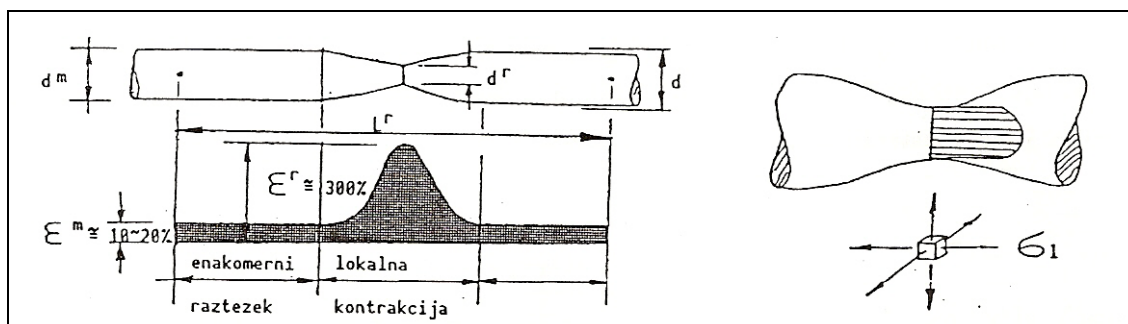
Za gradbene konstrukcije uporabljamo pretežno mehka konstrukcijska jekla z vsebnostjo ogljika pod 0,2%. Obnašanje mehkega jekla najboljše ilustrira diagram odvisnosti σ - ϵ , ki ga dobimo pri nateznem preizkusu palice konstantnega prereza d (slika 3).



Slika 3: Diagram odvisnosti σ - ϵ pri nateznem preizkusu palice konstantnega prereza

Na delu diagrama 0-A imamo elastičen, reverzibilen odnos napetosti in deformacije-Hookovo premico. Točka A predstavlja mejo elastičnosti materiala. Raztezek znaša pri meji elastičnosti do 0,1%. Od točke A dalje do točke D je področje plastičnega tečenja. Točki B in C predstavljata zgornjo in spodnjo mejo plastičnosti. Raztezek znaša v točki D za mehka konstrukcijska jekla okoli 2% (tudi do 4%). Od točke D dalje je utrditev materiala. Pri plastični deformaciji materiala, v katerem je polno raznih dislokacij, se le te premikajo skozi kristale in povzročajo tvorbo novih dodatnih dislokacij. Te dislokacije se medsebojno ovirajo in tako otežujejo dodatno preoblikovanje, material se utrjuje. Za nadaljno plastifikacijo je potrebno stalno povečevanje napetosti, zato govorimo o utrditvi materiala. Pri nadaljnjem večanju napetosti in s tem plastičnih deformacij pride najprej do rušenja kristalov, nato pa

končno do porušitve-pretrga preizkušanca. Krivulja 1 predstavlja inženirski diagram jekla, ki predpostavlja, da se prerez preizkušanca med preizkusom ne spreminja. Krivulja 2 predstavlja diagram ob upoštevanju dejanskega (trenutnega) prereza palice (prerez palice se stalno, predvsem pa po nastopu kontrakcije, zmanjšuje), krivulja 3 pa korigirani diagram 2 ob upoštevanju večosnega napetostnega stanja zaradi pojava kontrakcije. S točko E je označena natezna trdnost materiala (čeprav se material tu še ne poruši). Raztezek je v tej točki okoli 20% (pri zelo trdih jeklih lahko le 4 do 6%), v točki F, kjer pride do pretrga palice, pa je raztezek od 20 do 30%. Približno do točke E se palica po dolžini enakomerno razteza, nato pa se prične palica le na enem mestu zoževati in vsi raztezki se izvršijo naprej na tem delu (slika 4).

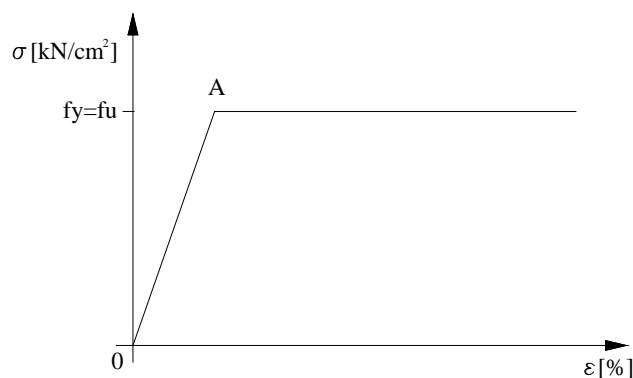


Slika 4: Lokalna kontrakcija

Padajoči del krivulje E-F je zelo odvisen od merske dolžine preizkušanca L_0 , zato je pomembno, da se uporabi proporcionalni preizkušavec (ploščat: $L_0=5,65A_0$, okrogel: $L_0=5A_0$).

2.2 Idealiziran bilinearni elastično-plastični materialni model

Pri računu mejne nosilnosti vijačenih stikov s programom AceFEM sem uporabil idealiziran bilinearni elastično-plastični model brez utrjevanja. To pomeni da je diagram odvisnosti σ - ε bilinearen (slika 5).

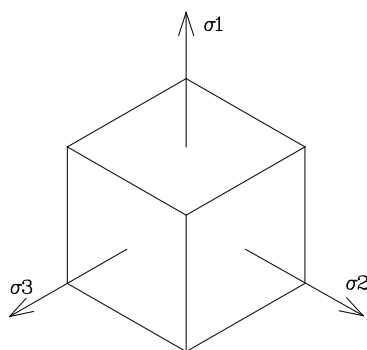


Slika 5: Idealiziran bilinearni diagram σ - ε

Na delu grafa 0-A imamo elastičen, reverzibilen odnos napetosti in deformacije-Hookovo premico. V točki A dosežemo mejo elastičnosti f_y , ki je v tem primeru enaka natezni trdnosti materiala f_u . Raztezek znaša pri meji elastičnosti do 0,1%. Od točke A naprej velja konstantna vrednost napetosti za poljubno deformacijo-utrjevanja ni.

2.3 Von-Misesov pogoj tečenja

Na plastičnost materiala močno vpliva prostorsko napetostno stanje (slika 6). Plastična deformacija je tista, ki po razbremenitvi ne izgine. Ali se bodo materiali deformirali plastično ali bo elastični deformaciji sledil lom, je odvisno od napetostnega stanja in sposobnosti materialov za plastično deformacijo (duktilnost). Plastično deformacijo povzroča strižna napetost, medtem ko lom natezna. Če hočemo omogočiti plastično deformacijo materiala, moramo z napetostnim stanjem zagotoviti čim večjo strižno napetost ob čim manjši natezni. V homogenem in izotropnem materialu se prične plastična deformacija, ko napetost preseže napetost tečenja. V primeru prostorskega napetostnega stanja je potrebno za kovine izračunati primerjalno napetost po enačbi (2.1). Pogoj za nastop plastičnosti je podan po teoriji minimalne preobrazne energije.



Slika 6: Prostorsko napetostno stanje

Napetosti σ_1 , σ_2 in σ_3 predstavljajo glavne normalne napetosti.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \leq fy \quad (2.1)$$

$$\sigma_1 = \sigma_{\max} \quad \alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \quad \beta = \frac{\sigma_3}{\sigma_1}$$

$$\sigma_{eq} = \sigma_1 \sqrt{\frac{1}{2}(1 - \alpha)^2 + (\alpha - \beta)^2 + (\beta - 1)^2} \leq fy \quad (2.2)$$

$$\Phi \sigma_1 \leq fy \rightarrow \sigma_1 = \frac{fy}{\Phi} \quad (2.3)$$

Von-Misesov pogoj tečenja nam pove, kolikšna mora biti pri določenem napetostnem stanju glavna napetost σ_1 , da bo prišlo do plastifikacije materiala. Parameter Φ imenujemo koeficient utrditve. Je brezdimenzionalno število, odvisno le od parametrov α in β .

Velja:

$\Phi \sigma_1 - fy < 0$ -ni tečenja (elastičen material)

$\Phi \sigma_1 - fy = 0$ -jeklo teče (2.4)

$\Phi \sigma_1 - fy > 0$ -fizikalno ni možno

2.4 Posplošeni Hookov zakon

Zveze med napetostmi in deformacijami za linearno elastični izotropni material opisujejo enačbe (2.5), (2.6), (2.7) in (2.8).

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx} &= \frac{1+\nu}{E}\sigma_{xx} - \frac{\nu}{E}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) + \alpha_T \Delta T + \varepsilon_K \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{1+\nu}{E}\sigma_{yy} - \frac{\nu}{E}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) + \alpha_T \Delta T + \varepsilon_K\end{aligned}\quad (2.5)$$

$$\begin{aligned}\varepsilon_{zz} &= \frac{1+\nu}{E}\sigma_{zz} - \frac{\nu}{E}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) + \alpha_T \Delta T + \varepsilon_K \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{\sigma_{xy}}{2G}, \quad \varepsilon_{yz} = \frac{\sigma_{yz}}{2G}, \quad \varepsilon_{zx} = \frac{\sigma_{zx}}{2G}\end{aligned}\quad (2.6)$$

V enačbah (2.5) in (2.6) α_T predstavlja koeficient temperaturnega raztezka, ΔT je sprememba temperature in ε_K je deformacija zaradi krčenja.

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= 2\mu\varepsilon_{xx} + \lambda(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) - \beta_T \Delta T - \beta_K \varepsilon_K \\ \sigma_{yy} &= 2\mu\varepsilon_{yy} + \lambda(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) - \beta_T \Delta T - \beta_K \varepsilon_K\end{aligned}\quad (2.7)$$

$$\begin{aligned}\sigma_{zz} &= 2\mu\varepsilon_{zz} + \lambda(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}) - \beta_T \Delta T - \beta_K \varepsilon_K \\ \sigma_{xy} &= 2\mu\varepsilon_{xy}, \quad \sigma_{yz} = 2\mu\varepsilon_{yz}, \quad \sigma_{zx} = 2\mu\varepsilon_{zx}\end{aligned}\quad (2.8)$$

2.4.1 Ravniško napetostno stanje (RNS)

Ravniško napetostno stanje je v ravnini x,y definirano z enačbami (2.9).

$$\begin{aligned}\vec{\sigma}_x &= \sigma_{xx} \vec{e}_x + \sigma_{xy} \vec{e}_y, \quad (\sigma_{xz} = 0) \\ \vec{\sigma}_y &= \sigma_{yx} \vec{e}_x + \sigma_{yy} \vec{e}_y, \quad (\sigma_{yz} = 0) \\ \vec{\sigma}_z &= \sigma_{zx} \vec{e}_x + \sigma_{zy} \vec{e}_y, \quad (\sigma_{zz} = 0)\end{aligned}\quad (2.9)$$

Iz enačb (2.9) vidimo, da so v primeru ravniškega napetostnega stanja napetosti v z -smeri enake nič ($\sigma_{xz} = \sigma_{yz} = \sigma_{zz} = 0$). Deformacija ε_{zz} pa je različna od nič in je definirana z enačbo (2.10).

$$\varepsilon_{zz} = -\frac{\nu}{1+\nu}(\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) + \frac{1+\nu}{1-\nu} \varepsilon_{TK}\quad (2.10)$$

2.4.2 Ravninsko deformacijsko stanje (RDS)

Ravninsko deformacijsko stanje je v ravnini x,y definirano z enačbami (2.11).

$$\begin{aligned}\varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u_x}{\partial x}, & \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial u_y}{\partial y}, & \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \\ \varepsilon_{xy} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right), & \varepsilon_{yz} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) = 0, & \varepsilon_{zx} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) = 0\end{aligned}\tag{2.11}$$

Iz enačb (2.11) vidimo, da so v primeru ravninskega deformacijskega stanja deformacije v z -smeri enake nič ($\varepsilon_{xz} = \varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zz} = 0$). Napetost σ_{zz} pa je različna od nič in je definirana z enačbo (2.12).

$$\sigma_{zz} = \nu (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) - E \varepsilon_{TK}\tag{2.12}$$

3 PROJEKTIRANJE VIJAČENIH STIKOV

3.1 Splošno

Vijačene stike pri jeklenih konstrukcijah je potrebno projektirati v skladu s standardom: Evrokod 3:Projektiranje jeklenih konstrukcij 1-8.del: Projektiranje spojev. Ta del evropskega standarda EN 1993 navaja metode projektiranja stikov, izpostavljenih pretežno statični obremenitvi in izdelanih iz jekel naslednjih kakovostnih razredov: S235, S275, S355 in S460. Vsi stiki morajo imeti takšno projektno nosilnost, da je konstrukcija zmožna izpolniti vse osnovne projektne zahteve tega standarda. Nosilnost stika mora biti določena na podlagi nosilnosti osnovnih komponent. Pri projektiranju stikov se lahko uporabi linearno-elastična ali elastično-plastična analiza. Kadar se za prevzem strižne obtežbe uporabljajo vezna sredstva z različno togostjo, je treba stik projektirati tako, da vezna sredstva z največjo togostjo prevzamejo celotno projektno obtežbo.

Vozlišča morajo biti projektirana ob upoštevanju realističnih predpostavk o razporeditvi notranjih sil in momentov. Pri določanju razporeditve sil je treba upoštevati naslednje predpostavke:

- v vozlišču predpostavljene(izračunane) notranje sile in momenti morajo biti v ravnotežju s silami in momenti, ki delujejo na vozlišče
- vsak element v vozlišču mora biti sposoben prevzeti pripadajoče notranje sile in momente
- deformacije, vsiljene s predpostavljenim razporedom notranjih sil, ne smejo presežati deformacijske kapacitete veznih sredstev in priključenih elementov
- predpostavljeni razpored notranjih sil mora upoštevati relativne togosti znotraj vozlišča
- deformacije, predpostavljene v kateremkoli računskem modelu, ki temelji na elastično-plastični analizi, temeljijo na rotaciji togih teles in/ali deformacijah v ravnini rotacije, ki so fizično mogoče
- vsak uporabljen model mora biti v skladu z vrednotenjem rezultatov preskusov

3.2 Razpored lukenj za vijake

Čim manjše razmike med vijaki si želimo zaradi majhnosti stika in zaradi dejstva, da imajo daljši stiki manjšo nosilnost, zaradi deformabilnosti pločevin. Najmanjši dovoljeni razmiki pri razporeditvi lukenj so povezani s projektno nosilnostjo pločevin na bočni pritisk in zagotavljajo, da pri izkoriščeni nosilnosti na bočni pritisk ne pride do iztrganja strižno

obremenjenega vijaka ali skupine vijakov iz pločevine. Razmik med vijaki mora omogočiti raztros sil pod kotom $\alpha=30^0$ in s tem zagotoviti, da vijaki delujejo neodvisno.

Razdalje in razmiki, glej sliko 3.1	Najmanj	Največ ^{1) 2) 3)}		
		Konstrukcije iz jekel v skladu z EN 10025, razen jekel v skladu z EN 10025-5		Konstrukcije iz jekel v skladu z EN 10025-5
		Jeklo, izpostavljeno vremenskim ali drugim korozivnim vplivom	Jeklo ni izpostavljeno vremenskim ali drugim korozivnim vplivom	Korozivno nezaščiteno jeklo
Robna razdalja e_1	$1,2d_0$	$4t + 40$ mm		Večje od $8t$ ali 125 mm
Robna razdalja e_2	$1,2d_0$	$4t + 40$ mm		Večje od $8t$ ali 125 mm
Razdalja e_3 v podaljšanih luknjah	$1,5d_0$ ⁴⁾			
Razdalja e_4 v podaljšanih luknjah	$1,5d_0$ ⁴⁾			
Razmik p_1	$2,2d_0$	Manjše od $14t$ ali 200 mm	Manjše od $14t$ ali 200 mm	Manjše od $14t_{min}$ ali 175 mm
Razmik $p_{1,0}$		Manjše od $14t$ ali 200 mm		
Razmik $p_{1,i}$		Manjše od $28t$ ali 400 mm		
Razmik p_2 ⁵⁾	$2,4d_0$	Manjše od $14t$ ali 200 mm	Manjše od $14t$ ali 200 mm	Manjše od $14t_{min}$ ali 175 mm

¹⁾ Največje vrednosti za razmike in robne razdalje so neomejene, razen v naslednjih primerih:
 – pri tlačnih elementih, da se prepreči lokalno izbočenje oziroma lokalni uklon pločevin ali korozija izpostavljenih elementov;
 – pri izpostavljenih nateznih elementih, da se prepreči korozija.

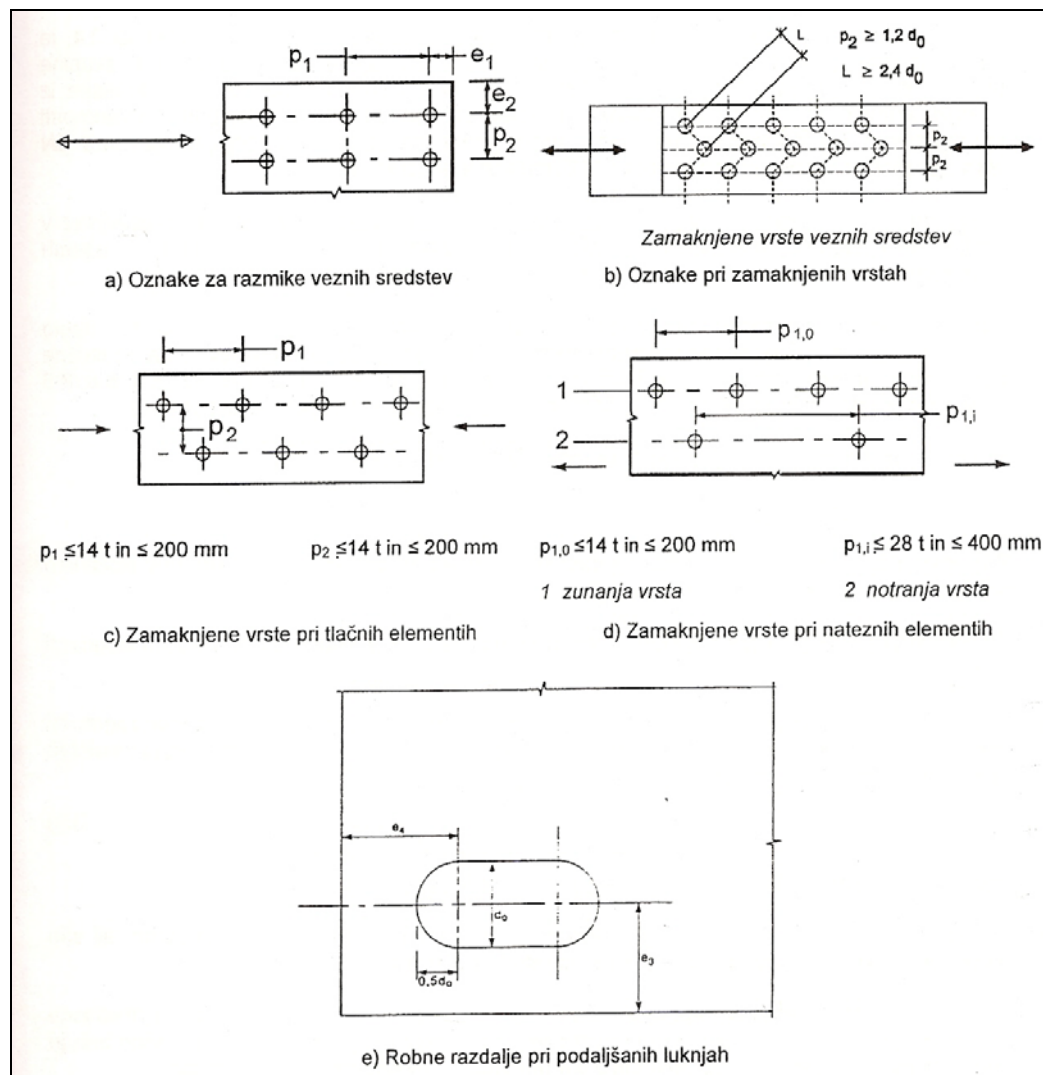
²⁾ Nosilnost tlačno obremenjenih pločevin na uklon med veznimi sredstvi se določi v skladu z EN 1993-1-1 ob upoštevanju uklonske dolžine $0,6 p_1$. Lokalnega uklona med veznimi sredstvi ni treba preveriti, če je razmerje p_1/t manjše od 9ϵ . Prečne robne razdalje ne smejo presežati dovoljenih vrednosti iz EN 1993-1-1, ki zagotavljajo odpornost previsnih delov tlačno obremenjenih pločevin proti lokalnemu izbočenju. Ta zahteva ne velja za robno razdaljo v smeri delovanja obtežbe.

³⁾ t je debelina tanjšega od zunanjih stikovanih elementov.

⁴⁾ Geometrijske omejitve za podaljšane luknje so dane v referenčnih standardih 7. skupine (glej 1.2.7).

⁵⁾ Pri zamaknjenih vrstah veznih sredstev se lahko uporabi najmanjši razmik $p_2 = 1,2d_0$, vendar je treba zagotoviti, da najmanjša razdalja med katerikoli veznim sredstvom, L , ni manjša od $2,4d_0$, glej sliko 3.1 b).

Slika 7: Najmanjši in največji razmiki in robne razdalje (Preglednica 3.3 v EN 1993-1-8, str.24)



Slika 8: Oznake za robne razdalje in razmike veznih sredstev

3.3 Projektna nosilnost posameznih veznih sredstev (EN 1993-1-8, 3.6)

-Projektna nosilnost posameznih veznih sredstev, obremenjenih strižno in/ali natežno, je dana v preglednici (slika 9).

-Natežno in strižno projektno nosilnost dela stebra vijaka z navojem, dani v preglednici (slika 9), je dovoljeno uporabljati samo pri vijakih, izdelanih v skladu z referenčnimi standardi 4. skupine standarda Evrokod 3:Projektiranje jeklenih konstrukcij 1-8.del: Projektiranje spojev. Za vijake z vrezanim navojem, kot so sidrni vijaki in natezne vezi,

izdelane iz okroglih jeklenih palic, pri katerih navoji izpolnjujejo zahteve EN 1090, se uporabljajo vrednosti iz preglednice (slika 9). Za vijake z vrezanimi navoji, pri katerih navoji ne izpolnjujejo zahtev v EN 1090, je treba vrednosti iz preglednice (slika 9) pomnožiti s faktorjem 0,85.

-Projektna nosilnost $F_{v,Rd}$, dana v preglednici (slika 9), se lahko uporablja samo za vijake v luknjah, pri katerih so premeri d_0 manjši ali enaki standardnim velikostim lukenj $d_{0,stand}$:

M12, M14 $d_{0,stand}=d + 1 \text{ mm}$

M16 - M24 $d_{0,stand}=d + 2 \text{ mm}$

M27 in več $d_{0,stand}=d + 3 \text{ mm}$

-Vijaki M12 in M14 se lahko uporabljajo v luknjah, ki imajo za 2mm večji premer kot steblo vijaka, če je projektna nosilnost skupine vijakov glede na bočni pritisk enaka ali večja od strižne nosilnosti te skupine vijakov. Poleg tega je treba za vijake trdnostnih razredov 4.8, 5.8, 6.8, 8.8 in 10.9 projektno strižno nosilnost $F_{v,Rd}$ iz preglednice (slika 9) pomnožiti s faktorjem 0,85.

-Vijaki s točnim naleganjem se projektirajo enako kot vijaki v običajnih luknjah.

-Pri vijakih s točnim naleganjem strižna ravnina ne poteka skozi navoje.

-Pri vijakih s točnim naleganjem dolžina dela stebila vijaka z navojem ne sme segati v pločevino več kot 1/3 debeline pločevine

-Tolerance za luknje pri vijakih s točnim naleganjem morajo biti v skladu z referenčnimi standardi 7.skupine

-Pri preklopnem stiku dveh pločevin z eno vrsto vijakov je treba zagotoviti podložko pod glavo vijaka in pod matico. Projektna nosilnost na bočni pritisk $F_{b,Rd}$ vsakega vijaka je omejena z naslednjim izrazom:

$$F_{b,Rd} \leq 1,5 f_u d t / \gamma_{M2} \quad (3.1)$$

-Pri vijakih 8.8 in 10.9, uporabljenih v preklopnem stiku dveh pločevin z enim vijakom ali eno vrsto vijakov, je treba uporabiti podložke s povečano površinsko trdoto.

-Pri vijakih in zakovicah obremenjenih strižno in na bočni pritisk, ki potekajo skozi distančne pločevine s skupno debelino t_p , večjo od tretjine nazivnega premera vijaka d , je treba strižno nosilnost $F_{v,Rd}$ iz preglednice (slika 9) pomnožiti z redukcijskim faktorjem β_p :

$$\beta_p = \frac{9d}{8d + 3t_p} \quad ; \text{vendar } \beta_p \leq 1 \quad (3.2)$$

-Pri dvostriznih stikih z distančnimi pločevinami na obeh straneh stika se za t_p vzame večja od obeh debelin.

-Za projektno nosilnost skupine veznih sredstev se lahko vzame vsota nosilnosti na bočni pritisk $F_{b,Rd}$ posameznih veznih sredstev, če je zagotovljeno, da je projektna strižna nosilnost $F_{v,Rd}$ posameznih veznih sredstev enaka ali večja od projektne nosilnosti na bočni pritisk $F_{b,Rd}$. V nasprotnem primeru se za nosilnost skupine veznih sredstev vzame produkt števila veznih sredstev in najmanjše projektne strižne nosilnosti kateregakoli veznega sredstva.

Način porušitve	Vijaki	Zakovice
Strižna nosilnost na eno strižno ravnino	$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}}$ – kadar strižna ravnina poteka skozi navoje (A je računski prerez A_s stebra vijaka skozi navoje): – trdnostni razredi 4.6, 5.6 in 8.8: $\alpha_v = 0,6$ – trdnostni razredi 4.8, 5.8, 6.8 in 10.9: $\alpha_v = 0,5$ – kadar strižna ravnina poteka skozi del stebra vijaka brez navojev (A bruto prečni prerez stebra vijaka): $\alpha_v = 0,6$	$F_{v,Rd} = \frac{0,6 f_{ur} A_0}{\gamma_{M2}}$
Nosilnost na bočni pritisk ^{1), 2), 3)}	$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}}$ kjer je α_b najmanjša vrednost od α_d ; $\frac{f_{ub}}{f_u}$ ali 1,0 v smeri delovanja obtežbe: – robni vijaki: $\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0}$; notranji vijaki: $\alpha_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}$ pravokotno na smer delovanja obtežbe: – robni vijaki: k_1 je najmanjša vrednost od $2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7$ ali 2,5 – notranji vijaki: k_1 je najmanjša vrednost od $1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7$ ali 2,5	
Natezna nosilnost ²⁾	$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}}$ kjer je $k_2 = 0,63$ za vijake z vgrezjeno glavo v drugih primerih $k_2 = 0,9$	$F_{t,Rd} = \frac{0,6 f_{ur} A_0}{\gamma_{M2}}$
Odpornost proti preboju pločevine	$B_{p,Rd} = 0,6 \pi d_m t_p f_u / \gamma_{M2}$	Kontrola ni potrebna
Sočasno delovanje striga in natega	$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 F_{t,Rd}} \leq 1,0$	
¹⁾ Nosilnost na bočni pritisk $F_{b,Rd}$ za vijake – v povečanih luknjah znaša 0,8-kratno nosilnost na bočni pritisk za vijake v običajnih luknjah; – v podaljšanih luknjah z vzdolžno osjo luknje, ki leži pravokotno na smer delovanja obtežbe, znaša 0,6-kratno nosilnost na bočni pritisk za vijake v običajnih okroglih luknjah. ²⁾ Vijaki z vgrezjeno glavo: – izračun projektne nosilnosti na bočni pritisk $F_{b,Rd}$ mora temeljiti na debelini t pločevine v spoju, zmanjšani za polovico globine vgreza glave vijaka; – pri določanju projektne natezne nosilnosti $F_{t,Rd}$ morata biti globina in naklon vgreza v skladu z zahtevami referenčnih standardov 4. skupine (glej 1.2.4). V nasprotnem primeru je treba natezno nosilnost $F_{t,Rd}$ ustrezno zmanjšati. ³⁾ Kadar rezultirajoča sila na vijak ni vzporedna robu pločevine, se lahko nosilnost na bočni pritisk določa ločeno za komponento sile, vzporedno robu, in komponento sile, pravokotno na rob.		

Slika 9: Projektna nosilnost posameznih veznih sredstev pri strižni in/ali natezni obremenitvi (Preglednica 3.4 v EN 1993-1-8, str.28)

3.4 Strižni iztrg

-Kadar je skupina lukenj nameščena ob robu pločevine (npr. ob koncu stojine I-prereza), lahko pride do strižnega pretrga (slika 10). Ob daljši stranici iztrganega bloka se pojavi strižna porušitev, ob krajši, pravokotni na smer delovanja strižne sile, pa natezna porušitev.

-Pri simetrični skupini vijakov, obremenjeni s koncentrirano obtežbo, se projektna nosilnost na strižni iztrg $V_{eff,1,Rd}$ izračuna po izrazu:

$$V_{eff,1,Rd} = f_u A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) f_y A_{nv} / \gamma_{M0} \quad (3.3)$$

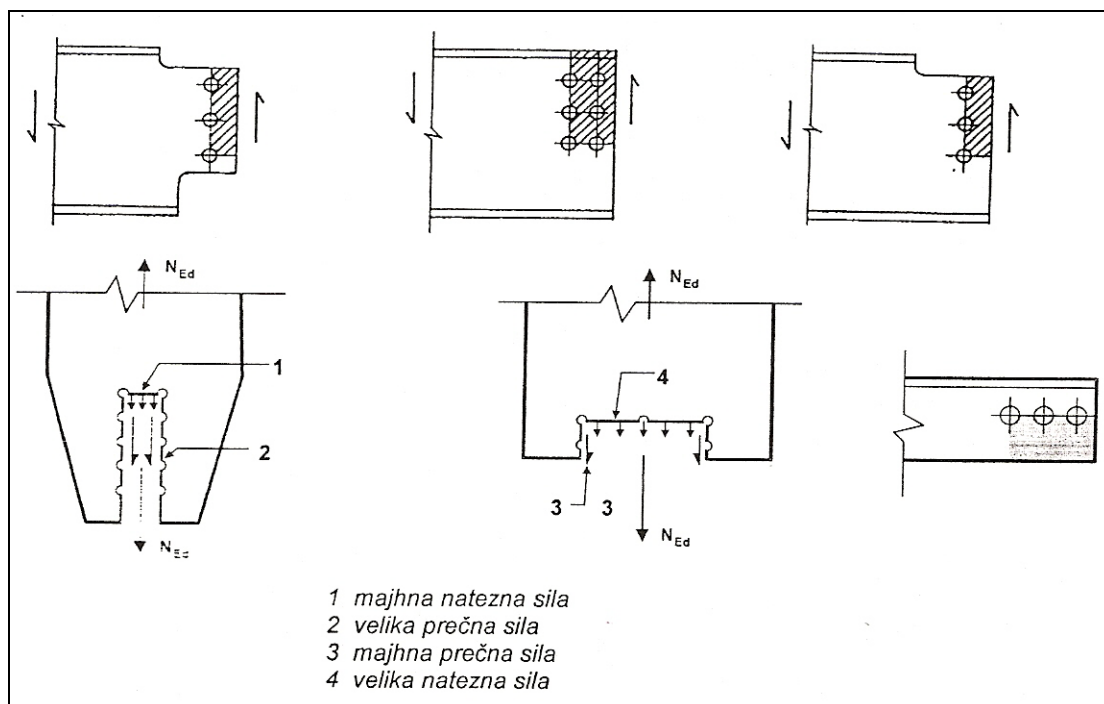
kjer sta:

A_{nt} -neto prerez območja pločevine v nategu

A_{nv} -neto prerez območja pločevine v strigu

-Pri skupini vijakov, obremenjeni z ekscentrično obtežbo, se projektna nosilnost na strižni iztrg $V_{eff,2,Rd}$ izračuna po izrazu:

$$V_{eff,2,Rd} = 0,5 f_u A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) f_y A_{nv} / \gamma_{M0} \quad (3.4)$$



Slika 10: Strižni iztrg

3.5 Nosilnost prečnih prerezov (EN 1993-1-1, 6.2)

3.5.1 Lastnosti prečnega prereza

3.5.1.1 Bruto prečni prerez

Lastnosti bruto prečnega prereza je treba določiti na podlagi nazivnih dimenzij. Lukenj za vezna sredstva ni treba odšteti, upoštevati pa je treba večje odprtine in izreze. Veznih pločevin ni dovoljeno upoštevati.

3.5.1.2 Neto prečni prerez

-Kot neto površino prečnega prereza je treba vzeti bruto površino in od nje odšteti vse luknje za vezna sredstva ter ostale odprtine in izreze.

-Pri računu neto prereza za posamezno luknjo velja, da se odšteje bruto prerez luknje, ki leži v ravnini osi te luknje. Pri luknjah za vijake in zakovice z vgreznjeno glavo je na ustrezen način treba upoštevati razširjeni del luknje.

-Če luknje veznih sredstev niso zamaknjene, je skupni prerez lukenj, ki se odšteje, enak največji vsoti prerezov lukenj v katerikoli prečnem prerezu elementa (glej kritično ravnino 2 na sliki 11).

-Kadar so luknje za vezna sredstva zamaknjene, je treba za skupno vsoto lukenj, ki se odšteje, vzeti večjo od naslednjih dveh vrednosti:

a) zmanjšanje za luknje, ki niso zamaknjene

$$b) t \left(n d_0 - \sum \frac{s^2}{4p} \right) \quad (3.5)$$

kjer so:

s -dolžina zamika, razdalja med središčema dveh sosednjih lukenj v cikcak verigi, merjena vzporedno z vzdolžno osjo elementa

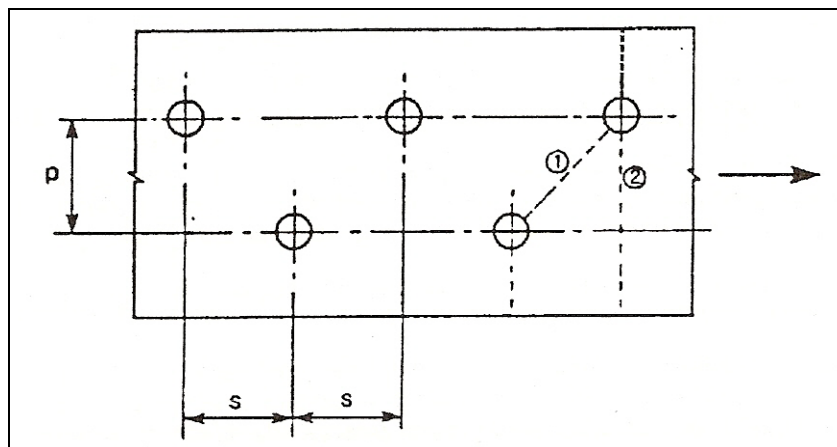
p -razdalja med središčema istih dveh lukenj, merjena pravokotno na vzdolžno os elementa

t -debelina obravnavanega dela prereza

n -število lukenj v katerikoli diagonalni ali cikcak črti prečno preko elementa (slika 11)

d_0 -premer luknje

-Pri kotnikih in drugih elementih z luknjami z več kot eno ravnino je treba razdaljo p meriti vzdolž srednje ravnine pločevin, ki sestavljajo prečni prerez.



Slika 11: Zamaknjene luknje in kritični črti pretrga 1 in 2

3.5.2 Nateg

-Projektna vrednost natezne sile N_{Ed} mora v vsakem prečnem prerezu izpolniti pogoj:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (3.6)$$

-Pri prečnih prerezih z luknjami se za natezno nosilnost vzame manjša od naslednjih dveh vrednosti:

a) projektna plastična nosilnost bruto prereza

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.7)$$

b) projektna mejna nosilnost neto prereza v območju lukenj za vezna sredstva

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (3.8)$$

-Za duktilno obnašanje stika, mora biti projektna plastična nosilnost bruto prereza $N_{pl,Rd}$ manjša od projektne mejne nosilnosti neto prereza $N_{u,Rd}$.

-Pri spojih C kategorije (glej EN 1993-1-8, 3.4.2(1)) se za projektno natezno nosilnost neto prereza $N_{t,Rd}$ vzame $N_{net,Rd}$:

$$N_{net,Rd} = \frac{A_{net} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.9)$$

3.5.3 Tlak

-Projektna vrednost tlačne sile N_{Ed} mora v vsakem prečnem prerezu izpolniti pogoj:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (3.10)$$

-Projektno nosilnost prečnega prereza pri tlačni obremenitvi $N_{c,Rd}$ je treba določiti na naslednji način:

$$N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \text{ -za 1.,2. ali 3. razred kompaktnosti} \quad (3.11)$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{M0}} \text{ -za 4. razred kompaktnosti} \quad (3.12)$$

-V tlačno obremenjenih elementih lukenj za vezna sredstva, razen povečanih in podaljšanih lukenj, določenih v EN 1090, ni treba upoštevati, če so zapolnjene z veznimi sredstvi.

-Pri nesimetričnih prečnih prerezih v 4. razredu kompaktnosti je treba zaradi ekscentričnosti težiščne osi sodelujočega prečnega prereza upoštevati dodatni upogibni moment ΔM_{Ed} .

3.5.4 Upogibni moment

-Projektna vrednost upogibnega momenta M_{Ed} mora v vsakem prečnem prerezu izpolniti pogoj:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (3.13)$$

kjer je $M_{c,Rd}$ določen ob upoštevanju lukenj za vezna sredstva.

-Projektna upogibna nosilnost za eno glavno os prečnega prereza je opredeljena, kot sledi:

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} \text{-za 1. ali 2. razred kompaktnosti} \quad (3.14)$$

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el,min} f_y}{\gamma_{M0}} \text{-za 3. razred kompaktnosti} \quad (3.15)$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff,min} f_y}{\gamma_{M0}} \text{-za 4. razred kompaktnosti} \quad (3.16)$$

kjer se $W_{el,min}$ in $W_{eff,min}$ nanašata na vlakna, najbolj oddaljena od težišča, z največjo elastično napetostjo.

-V natezni pasnici se lahko luknje za vezna sredstva zanemarijo, če je za natezno pasnico izpolnjen pogoj:

$$\frac{A_{f,net} 0,9 f_u}{\gamma_{M2}} \geq \frac{A_f f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.17)$$

kjer je A_f površina bruto prereza natezne pasnice.

-Lukenj za vezna sredstva v stojini ni treba upoštevati, če je pogoj pod prejšnjo točko izpolnjen za celotno natezno območje prečnega prereza, sestavljeno iz natezne pasnice in natezno obremenjenega dela stojine.

-V tlačno obremenjenih delih prereza lukenj za vezna sredstva, razen povečanih in podaljšanih lukenj, ni treba upoštevati, če so zapolnjene z veznimi sredstvi.

3.5.5 Strig

-Projektna vrednost prečne sile V_{Ed} mora v vsakem prečnem prerezu izpolniti pogoj:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (3.18)$$

kjer je $V_{c,Rd}$ projektna strižna nosilnost. Pri projektiranju s plastično metodo je $V_{c,Rd}$ projektna strižna plastična nosilnost $V_{pl,Rd}$. Pri projektiranju z elastično metodo je $V_{c,Rd}$ projektna elastična nosilnost.

-Kadar torzija ni prisotna, je projektna strižna plastična nosilnost dana z:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \quad (3.19)$$

kjer je A_v površina strižnega prereza.

-Površina strižnega prereza A_v se lahko izračuna na naslednji način:

a) vroče valjani I- in H-profil, obtežba, vzporedna stojini: $A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f$, vendar ne manj od $\eta h_w t_w$

b) vroče valjani U-profil, obtežba, vzporedna stojini: $A - 2bt_f + (t_w + r)t_f$

c) vroče valjani T-profil, obtežba, vzporedna stojini: $0,9(A - bt_f)$

d) varjeni I- in H-profil ter škatlasti profili, obtežba, vzporedna stojini: $\eta \sum (h_w t_w)$

e) varjeni I-, H- in U-profil ter škatlasti profili, obtežba, vzporedna pasnicam: $A - \sum (h_w t_w)$

f) valjani pravokotni votli profili z enakomerno debelino stene:

-obtežba, vzporedna višini profila: $Ah/(b + h)$

-obtežba, vzporedna širini profila: $Ab/(b + h)$

g) okrogli votli profili in cevi z enakomerno debelino stene: $2A/\pi$

kjer so:

A -površina prečnega prereza

b -celotna širina prereza

h -celotna višina prereza

h_w -višina stojine

r -polmer zaokrožitve pri vroče valjanih profilih

t_f -debelina pasnice

t_w -debelina stojine (če debelina stojine ni konstantna, je za t_w treba vzeti najmanjšo debelino)

η -glej 1993-1-5

OPOMBA: Konservativna vrednost za η je 1,0.

-Če lokalno izbočenje v strigu ni merodajno (glej poglavje 5 v EN 1993-1-5), se lahko pri kontroli projektne elastične strižne nosilnosti $V_{c,Rd}$ za kritično točko prečnega prereza uporabi naslednji pogoj:

$$\frac{\tau_{Ed}}{f_y / (\sqrt{3} \gamma_{M0})} \leq 1,0 \quad (3.20)$$

kjer se lahko τ_{Ed} izračuna z enačbo:

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed} S}{I t} \quad (3.21)$$

kjer so:

V_{Ed} -projektna vrednost prečne sile

S -statični moment dela prereza nad obravnavano točko

I -vztrajnostni moment celotnega prečnega prereza

t -debelina stene prečnega prereza v obravnavani točki

OPOMBA:Preverjanje v skladu s 4. točko tega poglavja je konservativno, ker ne upošteva delne plastične prerazporeditve strižnih napetosti, ki je dovoljena pri elastični analizi (glej 5. točko). Zato naj se to preverjanje uporablja samo takrat, ko preverjanje z enačbo (3.18) ni mogoče.

-Pri I- in H-profilih se lahko strižna napetost v stojini izračuna z enačbo:

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{A_w}, \text{ če je } A_f / A_w \geq 0,6 \quad (3.22)$$

kjer so:

A_f -površina prečnega prereza ene pasnice

A_w -površina stojine: $A_w = h_w t_w$

-Dodatno je treba pri stojinah brez vmesnih ojačitev preveriti odpornost proti lokalnemu izbočenju v strigu v skladu s poglavjem 5 v EN 1993-1-5, če je:

$$\frac{h_w}{t_w} \geq 72 \frac{\varepsilon}{\eta} \quad (3.23)$$

η -glej 1993-1-5

OPOMBA: Konservativna vrednost za η je 1,0.

-Pri preverjanju strižne nosilnosti prečnega prereza, lukenj za vezna sredstva ni treba upoštevati, razen pri kontroli strižne nosilnosti spojev (glej EN 1993-1-8).

-Kadar ob prečni sili sočasno deluje tudi torzijski moment, je treba plastično nosilnost $V_{pl,Rd}$ zmanjšati.

3.5.6 Upogib in strig

-Kadar je prisotna prečna sila, je treba upoštevati njen vpliv na upogibno nosilnost prečnega prereza.

-Kadar je prečna sila manjša od polovice plastične strižne nosilnosti, se njen vpliv na upogibno nosilnost zanemari, razen v primeru, ko lokalno izbočenje v strigu zmanjša nosilnost prereza, glej EN 1993-1-5.

-Zmanjšana upogibna nosilnost se izračuna ob upoštevanju zmanjšane napetosti tečenja kot:

$$(1 - \rho) f_y \quad (3.24)$$

v območju strižnega prereza

$$\text{kjer sta } \rho = \left(\frac{2 V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2 \text{ in } V_{pl,Rd} \text{ projektna strižna plastična nosilnost} \quad (3.25)$$

$$\text{-Ob prisotnosti torzijskega momenta se } \rho \text{ izračuna z enačbo } \rho = \left(\frac{2 V_{Ed}}{V_{pl,T,Rd}} - 1 \right)^2, \quad (3.26)$$

$$\text{vendar pri } V_{Ed} \leq 0,5 V_{pl,T,Rd} \text{ velja: } \rho = 0. \quad (3.27)$$

-Zaradi vplivov strižne sile zmanjšana projektna plastična upogibna nosilnost za I-prereze z enakima pasnicama in za upogib okoli močne osi se lahko določi na naslednji način:

$$M_{y,V,Rd} = \frac{\left(W_{pl,y} - \frac{\rho A_w^2}{4 t_w} \right) f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.28)$$

$$\text{vendar } M_{y,V,Rd} \leq M_{y,c,Rd}$$

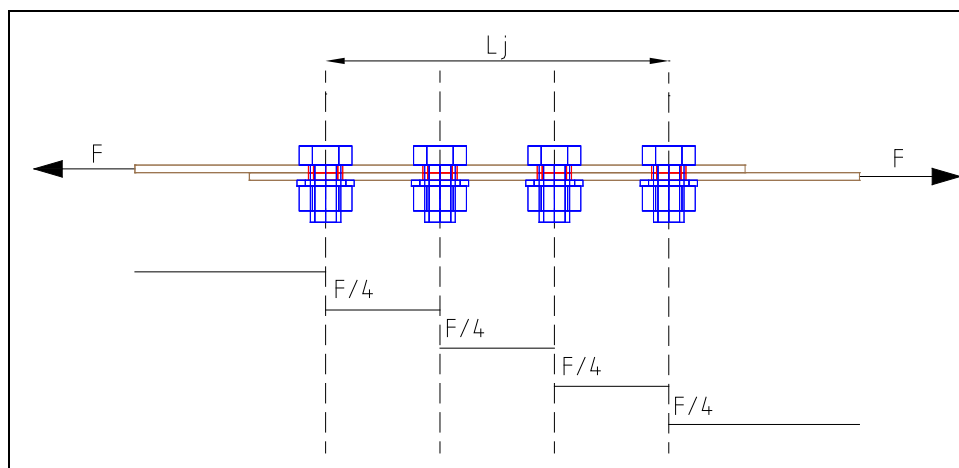
3.6 Razporeditev sil med vijaki

3.6.1 Kratki stiki

Kratki vijčeni stiki so tisti, pri katerih velja pogoj:

$$L_j < 15d \approx 6 \text{ vijakov}$$

Pri takšnih stikih velja enakomerna stopničasta razporeditev sil med vijaki (slika 12).



Slika 12: Razporeditev sil med vijaki pri kratkih stikih

Strižna nosilnost kratkega stika je definirana kot:

$$F_{Sd} \leq n m F_{v,Rd} \quad (3.29)$$

kjer je:

n -število vijakov

m -število strižnih ravnin

$F_{v,Rd}$ -projektna strižna nosilnost enega vijaka za eno strižno ravnino

3.6.2 Dolgi stiki

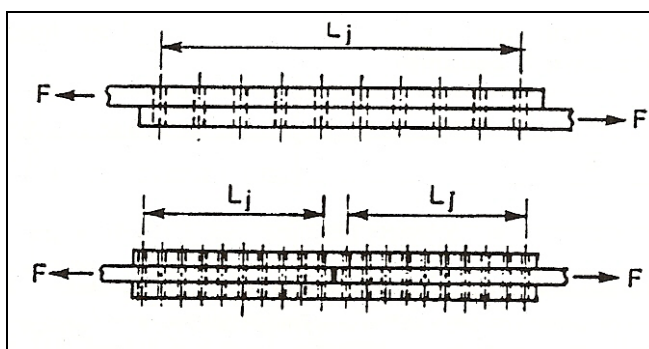
Pri dolgih stikih je zaradi vpliva deformabilnosti pločevin v območju stika razporeditev sil na vezna sredstva neenakomerna. Za dolge stike štejemo tiste, pri katerih je razdalja L_j med obema končnima veznima sredstvoma v smeri delovanja obtežbe (slika 13) večja od $15d$, kjer je d nominalni premer vijaka ali zakovice. Projektno strižno nosilnost vijakov ali zakovic v dolgih stikih $F_{v,Rd}$ je potrebno pomnožiti z redukcijskim količnikom β_{L_f} .

$$\beta_{L_f} = 1 - \frac{L_j - 15d}{200d}, \quad 0,75 \leq \beta_{L_f} \leq 1,0 \quad (3.30)$$

Zmanjšanja nosilnosti ne upoštevamo pri dolgih stikih, s katerimi omogočimo prenos kontinuirnega strižnega toka iz enega v drugi nosilni element (npr. strig med pasnico in stojino upogibno obremenjenega nosilca).

Strižno nosilnost dolgega stika definiramo kot:

$$F_{Sd} \leq \beta_{L_f} n m F_{v,Rd} \quad (3.31)$$



Slika 13: Dolgi stiki

4 PROGRAM AceFEM

4.1 Splošno

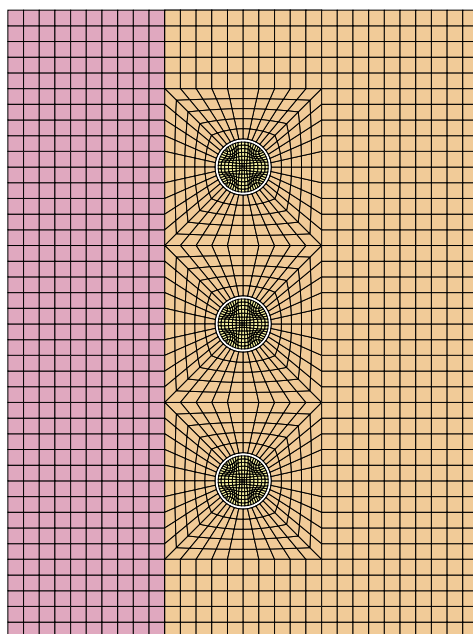
Program *AceFEM* je program za analizo, ki temelji na metodi končnih elementov. Namenjen je reševanju kompleksnih fizikalnih problemov in je v osnovi sestavljen iz dveh komponent. Glavni del je namenjen proceduram, ki niso numerično zahtevne (procesiranje in vnos podatkov, generiranje mrež elementov, nadzorovanje procedur, grafično post-procesiranje rezultatov). Numerični modul je namenjen numerično zahtevnim operacijam, kot so iz vrednotenje in zbiranje količin posameznih končnih elementov (tangenta matrika, rezultanta sil, vektorji...), reševanje sistema linearnih enačb in izvajanje procedur iskanja kontaktov. Numerični modul obstaja kot del paketa *Mathematica*, ali kot zunanji program, napisan v programskem jeziku C in povezan z *Mathematico* preko MathLink-a. Unikatna konfiguracija nam omogoča reševanje industrijskih problemov velikega merila, z nekaj sto tisoč neznankami. Z uporabo naprednih orodij *Mathematice*, kot so visoko precizna aritmetika, intervalna aritmetika ali simbolični izračun količin končnih elementov pa tudi za analizo različnih lastnosti numeričnih procedur na relativno majhnih primerih. Paket *AceFEM* vsebuje obsežno zbirko (knjižnico) končnih elementov (trdnine, toplotni, kontaktni, 2D, 3D...). Dodatni elementi pa so dosegljivi preko skupnega sistema končnih elementov AceShare. Prav tako je na relativno preprost način mogoče generirati nove končne elemente za svoje potrebe, s pomočjo *AceGen* paketa. Paket *AceFEM* je v kombinaciji s paketom za avtomatično generiranje kod *AceGen*, idealno orodje za rapiden razvoj novih numeričnih modelov.

4.2 Metoda končnih elementov

Z razvitjem metode končnih elementov je prenehala prevlada diferenčne metode pri numeričnem reševanju kompleksnih problemov mehanike. Največja pomankljivost metode končnih diferenc pa je slaba prilagodljivost mreže konturam konstrukcijskih elementov. V petdesetih letih prejšnjega stoletja je bila razvita metoda končnih elementov. Osnovne koncepte metode je prvi objavil ARGYRIS v letih 1954-55. Metoda bazira na uporabi matrične algebre, ob diskretizaciji konstrukcije na končne elemente. Na začetku njenega razvoja je njeno uporabo omejevala relativno velika količina potrebnih numeričnih operacij. Z razvojem računalniške opreme pa je ta težava odpadla. Metoda končnih elementov se je

najprej razvila na področju elasto-mehanike. Danes pa jo srečamo tudi pri reševanju problemov plasto-mehanike, problemov dinamike, prenosa toplote in termoelastičnosti, področjih fizike in numerične matematike.

Mehaniko konstrukcij delimo na mehaniko linijskih konstrukcij (enodimenzionalni elementi), ploskovnih konstrukcij (dvodimenzionalni elementi) in mehaniko teles (tridimenzionalni elementi). Metoda končnih elementov je splošna in enaka za vse tri tipe konstrukcij, kar omogoča kombiniranje zgoraj naštetih tipov konstrukcij pri postavljanju problema z metodo končnih elementov. Pri reševanju problemov z metodo končnih elementov konstrukcijo razdelimo na končne elemente (slika 14).



Slika 14: Razdelitev konstrukcije na končne elemente

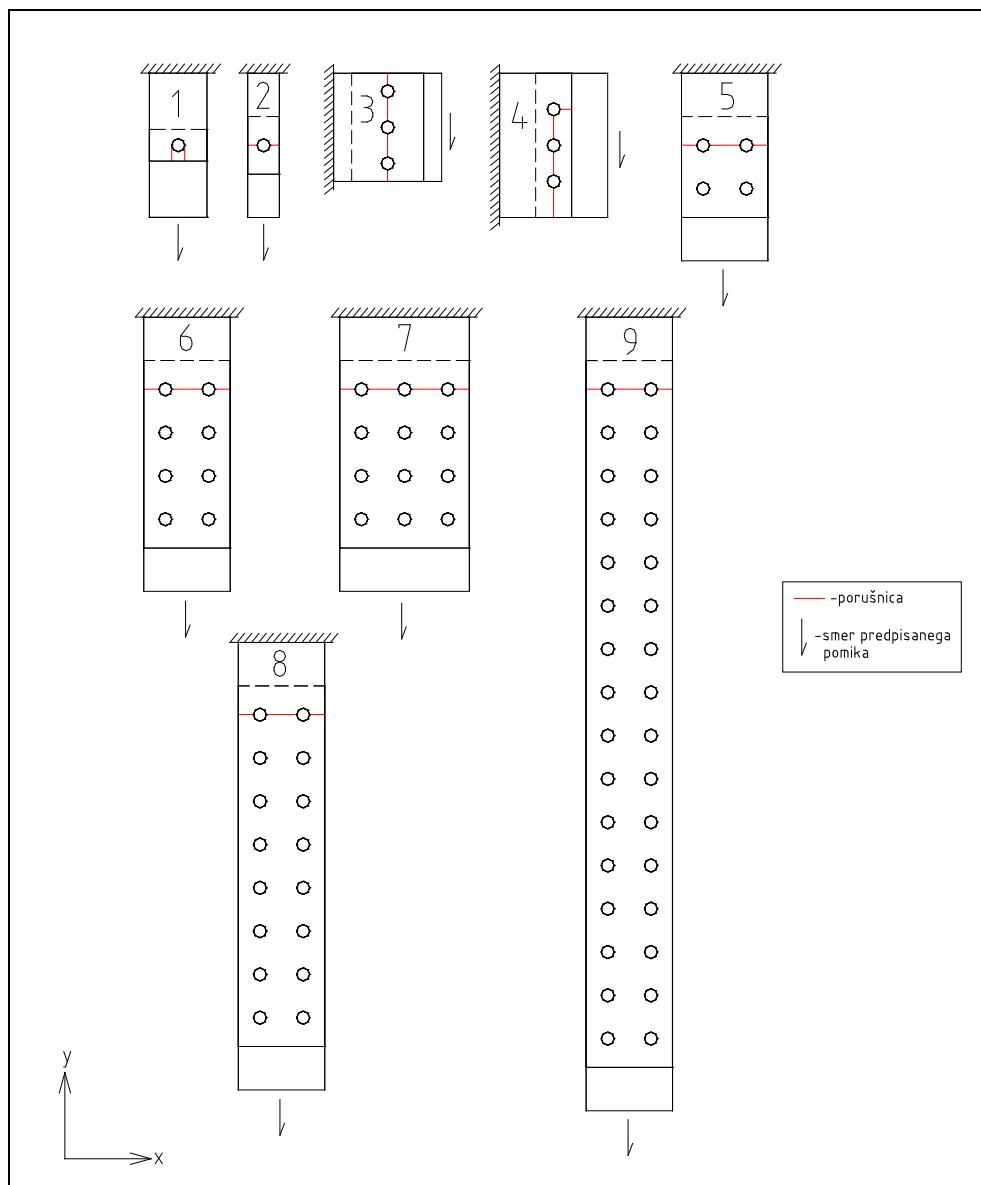
Za linijske konstrukcije so to nosilci ali deli nosilcev, za ploskovne trikotniki, pravokotniki in za konstrukcije v obliki teles tetraedri, heksaedri... Vozlišča končnih elementov so povezana med seboj in tvorijo konstrukcijo. S pomočjo enačb elasto-mehanike poiščemo zveze med pomiki v vozliščih in v poljih elementov. Tako dobljeno enačbo imenujemo *enačba končnega elementa*, v kateri nastopajo kot naznanke pomiki v vozliščih. Vse enačbe končnih elementov združimo v *enačbo konstrukcije*. Enačbo rešimo ob upoštevanju robnih pogojev in obremenitev. S pomočjo rešitve sistema enačb (pomikov), izračunamo specifične deformacije in napetosti. Opisano metodo imenujemo *deformacijska metoda končnih elementov*. V

primeru da so neznanke v vozliščih sile, pa govorimo o *metodi sil*. V praksi se izkaže, da ima deformacijska metoda več prednosti pred metodo sil.

5 DOLOČITEV MEJNE NOSILNOSTI VIJAČENEGA STIKA

5.1 Splošno

Za analizo sem izbral devet različnih primerov vijčenih preklopnih stikov, obremenjenih natezno ali strižno. Primeri so izbrani tako, da je za vsak primer značilna drugačna vrsta porušitve pločevine (slika 15).



Slika 15: Primeri stikov in porušitve

Kvaliteto vijakov smo izbrali tako, da pri nobenem primeru ni merodajna strižna porušitev veznih sredstev. Vsi stiki so sestavljeni iz dveh simetričnih pločevin (ena strižna ravnina) in

različnega števila vijakov. Pri vseh stikih sem uporabil mehko konstrukcijsko jeklo kvalitete S235 in navadne vijake M16 brez prednapenjanja, kvalitete 8.8, ki so vstavljeni v standardno velike luknje ($d_0 = d + 2mm$). Pri vseh primerih sem najprej izračunal kontrole za vijачene stike (najmanjši in največji razmiki vijakov in robne razdalje, kontrola bruto in neto prereza, strižna nosilnost vijakov, bočni pritiski, strižni iztrg) v skladu s standardom Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij 1-8.del: Projektiranje spojev. Pri kontrolah nosilnosti nisem upošteval materialnih varnostnih faktorjev, ker sem računal karakteristično vrednost mejne nosilnosti stikov (enačbe (5.1)). Najmanjšo silo, ki sem jo dobil kot rezultat posameznih kontrol, sem definiriral kot karakteristično mejno nosilnost posameznega vijachenega stika. To mejno nosilnost sem nato primerjal z izračunano mejno nosilnostjo iz numeričnih simulacij.

$$\begin{aligned} F_{Ed} &= \sum \gamma_i F_i \leq \frac{R_k}{\gamma_M} \\ \gamma_M (\sum \gamma_i F_i) &\leq R_k \\ R_k &= F_u \end{aligned} \tag{5.1}$$

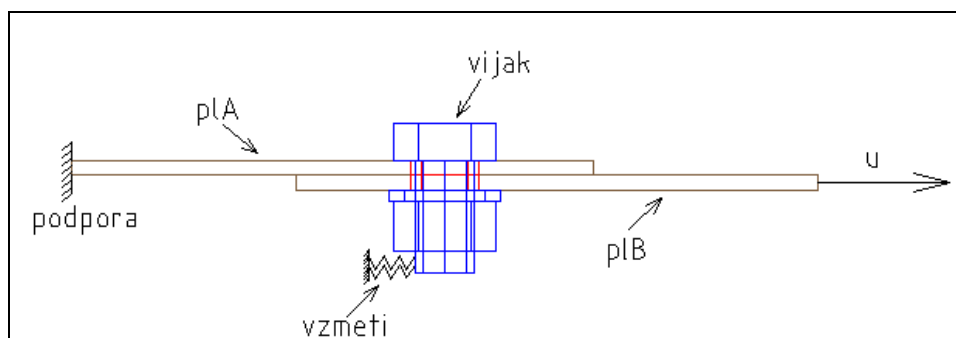
5.2 RNS/RDS

V realnosti dobimo v primeru vijachenega preklopnega stika kombinacijo ravninskega napetostnega in ravninskega deformacijskega stanja. Na mestih kjer pločevine stisnejo vijaki se zaradi pritiska podložk na pločevino ustvari prostorsko deformacijsko stanje. V okolici vijakov pa se v pločevini ustvari ravninsko napetostno stanje. Takšno kombinacijo napetostnih stanj je z dvodimenzionalnim numeričnim modelom težko opisati. Zato sem pri vsakem od devetih primerov vijachenih stikov naredil; varianto kjer sem v pločevinah predpostavil ravninsko napetostno stanje in varianto kjer sem predpostavil ravninsko deformacijsko stanje.

5.3 Analiza s programom AceFEM

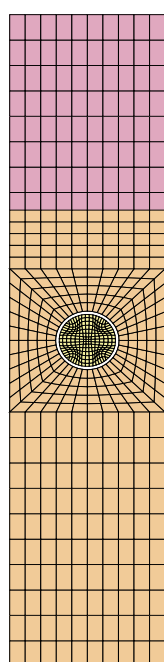
Za vsak primer vijachenega stika sem naredil še numerično analizo s programom AceFEM. Numerični model stika (slika 16) je v programu AceFEM definiran tako, da je sestavljen iz dveh pločevin p1A, p1B in določenega števila vijakov. Vijaki so v horizontalni smeri podprti z

vzmetmi. Togost vzmeti smo določili tako, da na vijak med simulacijo ne povzročajo sile, ki bi bila večja od 1/100 mejne sile F_u . Vzmeti imajo funkcijo, da na začetku analize (preden pločevini stisneta vijak) držijo vijak na mestu. Brez vzmeti, bi bil celoten problem singularen in v statičnem smislu neizračunljiv. Pločevina plA je na koncu vpeta, pločevina plB pa se premika v smeri delovanja obtežbe, s predpisanim pomikom u .

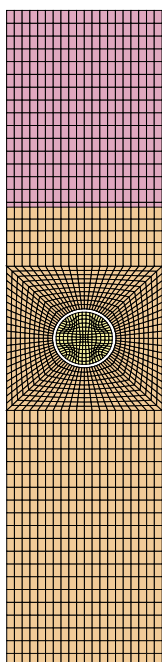


Slika 16: Numerični model stika

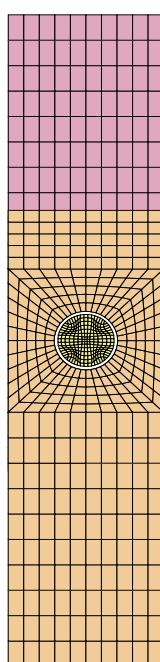
Najprej sem definiral vse vhodne podatke (dimenzije pločevin, karakteristike materiala, predpisan pomik, gostota mreže) in celotno konstrukcijo (domene, ravninsko deformacijsko ali ravninsko napetostno stanje, kontakt med vijaki in pločevinama, vijake, pločevini, podpore). V tej točki program sestavi konstrukcijo (stik). Sledi analiza konstrukcije, ki poteka na osnovi Newtonove iteracijske metode. Rezultat analize so količine (sila F , Misesova napetost, plastična deformacija...) v odvisnosti od pomika u . Mejno nosilnost vijačenega stika sem določil tako, da sem na grafu sila-pomik poiskal največjo silo in jo označil z F_u . Na koncu sem izrisal tudi grafe Misesove napetosti in napetosti σ_{yy} v različnih prerezih stika, grafe sil v vijakih in Misesovo napetost po celotnem stiku. Za vsakega izmed devetih primerov vijačenih stikov sem naredil osem različnih numeričnih modelov. Spreminjal sem gostoto mreže končnih elementov, ravninsko deformacijsko (RDS) ali ravninsko napetostno stanje (RNS) in delovanje funkcije SmoothMesh, ki sestavi mrežo končnih elementov, ki se bolj prilega geometriji pločevine. Na sliki 17 je prikazanih osem različnih numeričnih modelov za primer natezno obremenjenega stika z enim vijakom (Primer 2).



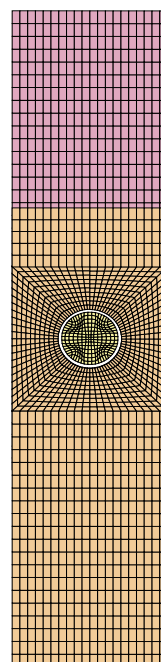
a) Navadna mreža (RDS)



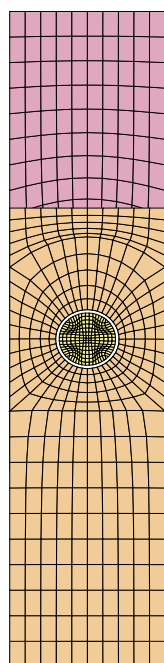
b) Gosta mreža (RDS)



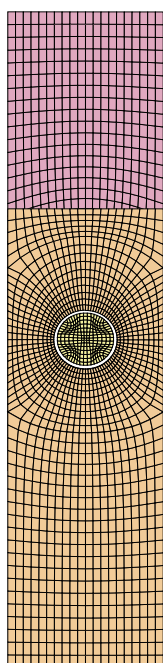
c) Navadna mreža (RNS)



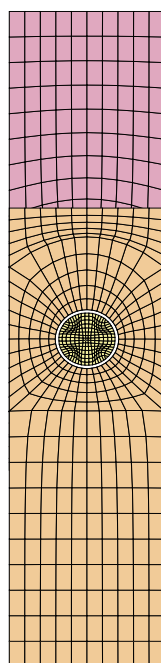
d) Gosta mreža (RNS)



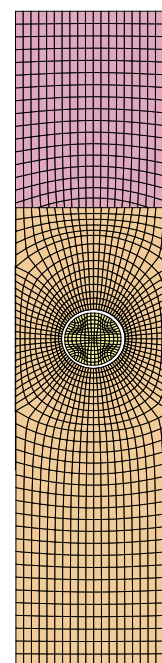
e) Navadna mreža (RDS)
SmoothMesh



f) Gosta mreža (RDS)
SmoothMesh



g) Navadna mreža (RNS)
SmoothMesh



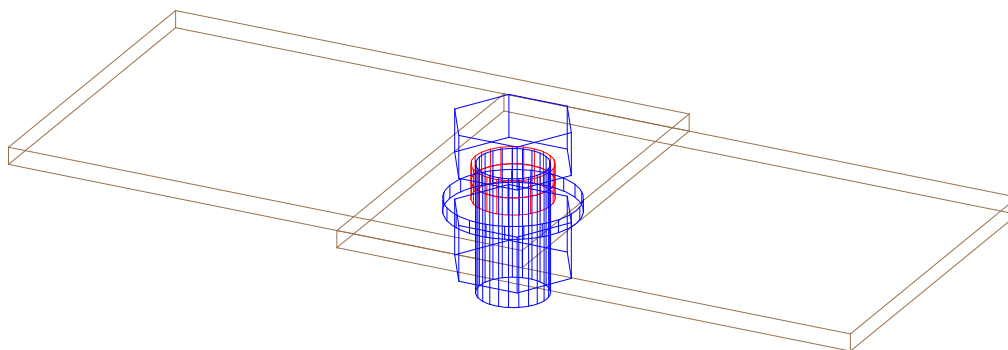
h) Gosta mreža (RNS)
SmoothMesh

Slika 17: Variante numeričnih modelov

6 REZULTATI

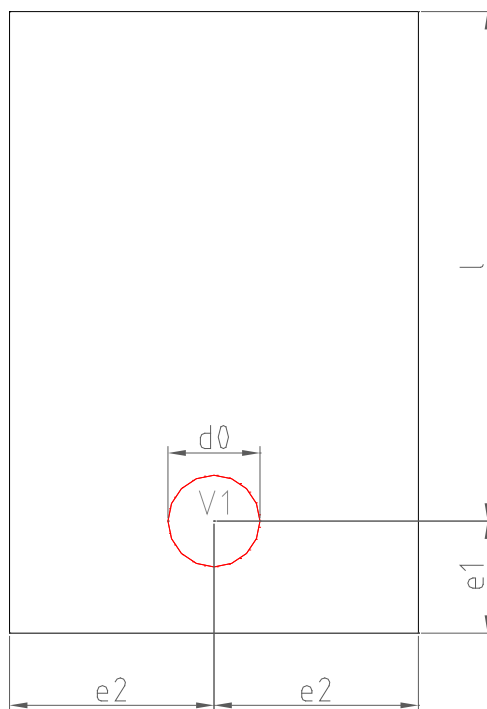
6.1 Primer 1-en vijak (nateg)

Računal sem mejno nosilnost natezno obremenjenega vijčenega stika, sestavljenega iz dveh simetričnih pločevin in enega vijaka (slika 18).



Slika 18: Skica primera 1

6.1.1 Geometrija pločevine



Slika 19: Geometrija pločevine primera 1

6.1.2 Račun nosilnosti po EN 1993-1-8

Jeklo: S235

Vijaki: M16 (8.8)

$$f_y = 23,5 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

$$f_{ub} = 80 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

$$t_h = 4 \text{ mm}$$

$$d = 16 \text{ mm}$$

$$d_0 = 18 \text{ mm}$$

$$e_1 = 22 \text{ mm}$$

$$e_2 = 40 \text{ mm}$$

$$l = 100 \text{ mm}$$

a) Strižna nosilnost vijaka

$$F_{V,k} = \alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A = 0,6 \cdot 80 \cdot 2,01 = 96,48 \text{ kN}$$

b) Kontrola bočnih pritiskov

$$F_{b,k} = 1,5 \cdot f_u \cdot d \cdot t = 1,5 \cdot 36 \cdot 1,6 \cdot 0,4 = 34,56 \text{ kN}$$

c) Kontrola bruto in neto prereza

$$N_{pl,k} = A \cdot f_y = 8 \cdot 0,4 \cdot 23,5 = 75,2 \text{ kN} \text{ -bruto prerez}$$

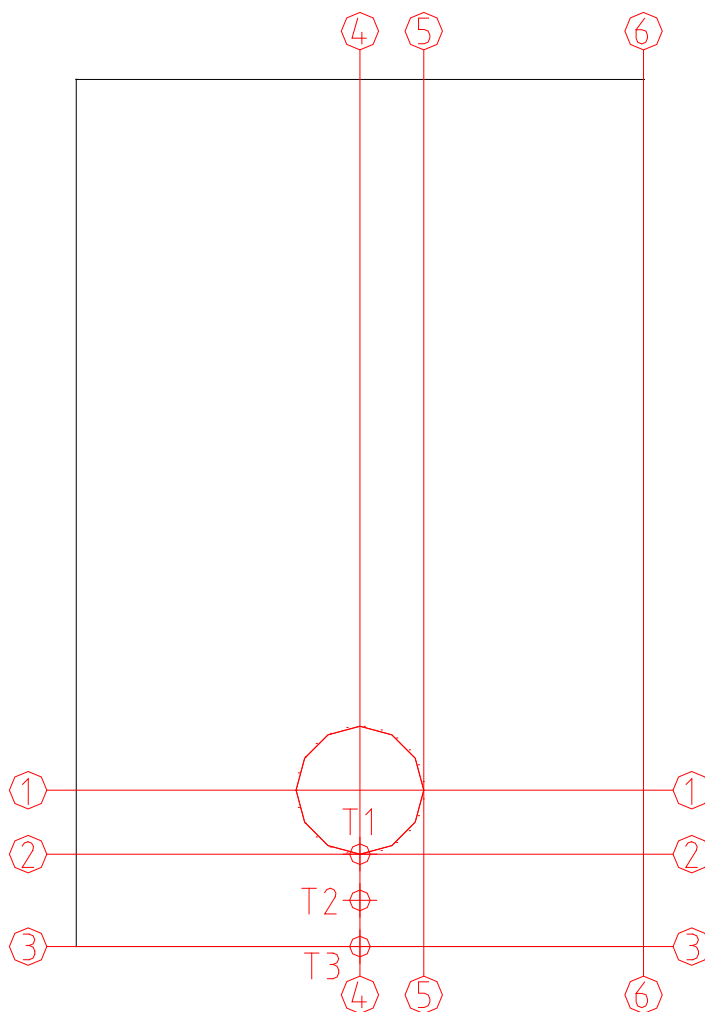
$$N_{u,k} = 0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u = 0,9 \cdot 6,2 \cdot 0,4 \cdot 36 = 80,35 \text{ kN} \text{ -neto prerez}$$

d) Strižni iztrg

$$V_{eff,1,k} = f_u \cdot A_{nt} + (1/\sqrt{3}) \cdot f_y \cdot A_{nv} = (1/\sqrt{3}) \cdot 23,5 \cdot 2 \cdot 2,2 \cdot 0,4 = 23,88 \text{ kN}$$

6.1.3 Analiza s programom AceFEM

Med analizo sem poleg sile F izrisoval, v odvisnosti od pomika, tudi plastično deformacijo in Misesovo napetost v točkah na pločevini T1, T2 in T3 (slika 20). Po končani analizi pa sem izrisal grafe napetosti σ_{yy} in Misesove napetosti po prečnih in vzdolžnih prerezih pločevine (slika 20).

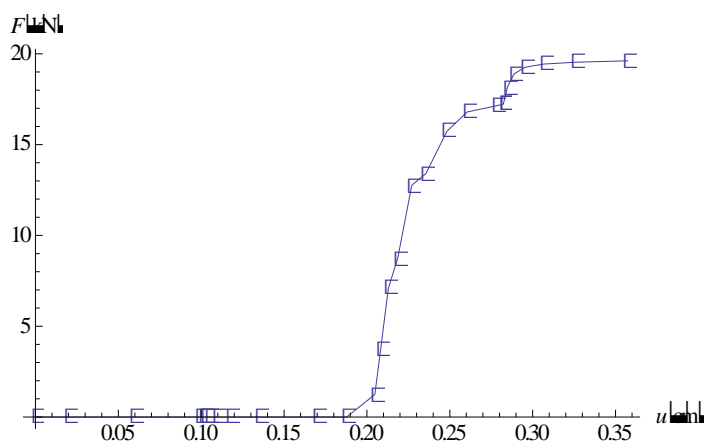


Slika 20: Točke in prerezi za primer 1

6.1.3.1 Varianta A

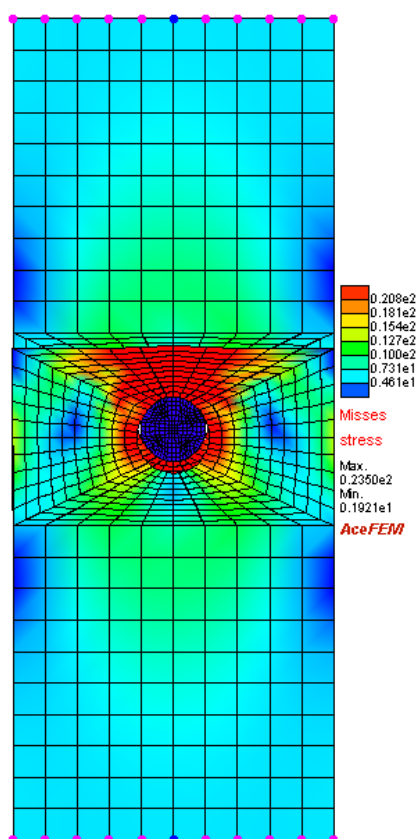
Predpostavke v AceFEM-u:

- ravninsko deformacijsko stanje
- navadna gostota mreže
- funkcija SmoothMesh je izključena

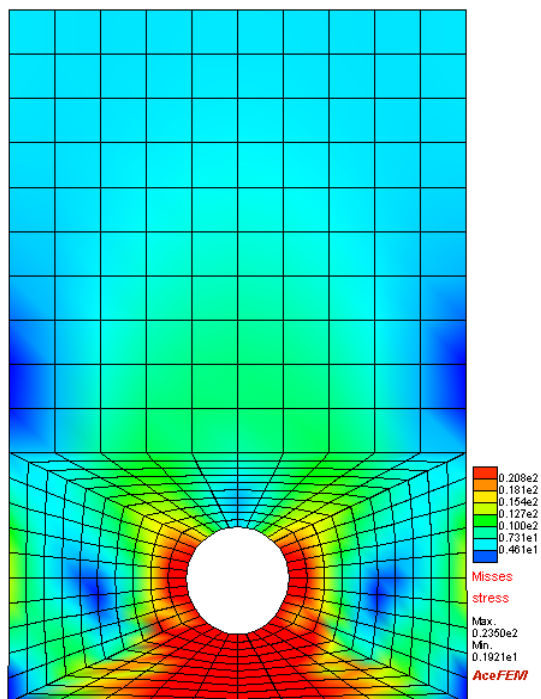


Slika 21: Sila-pomik

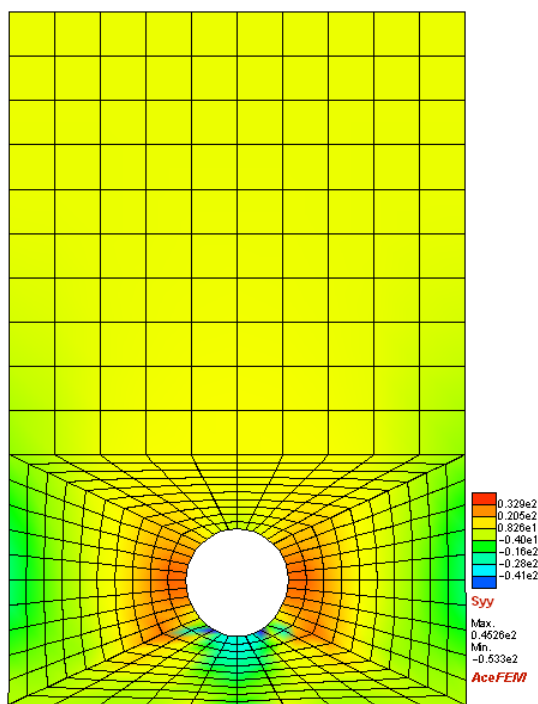
Mejna sila $F_u = 19,7229$ kN



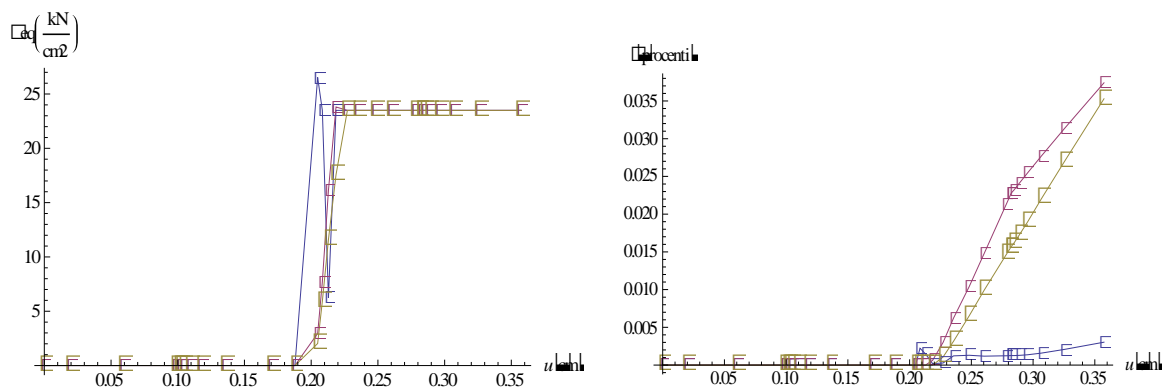
Slika 22: Misesova napetost po stiku



Slika 23: Misesova napetost po pločevini

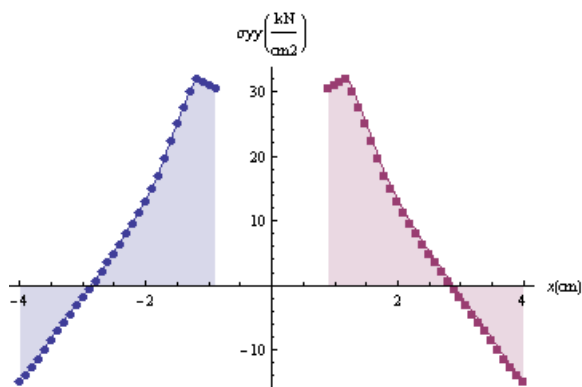


Slika 24: Napetost σ_{yy} po pločevini

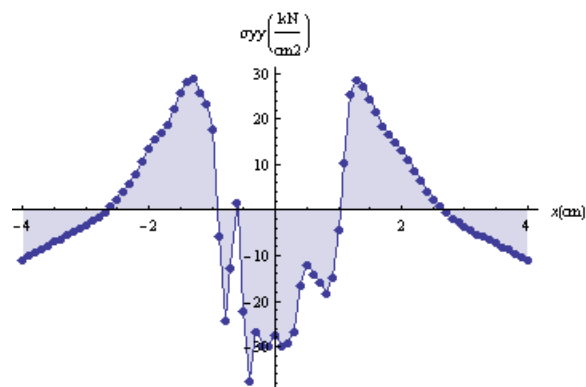


Slika 25: Misesova napetost in plastična deformacija v točkah T1, T2 in T3

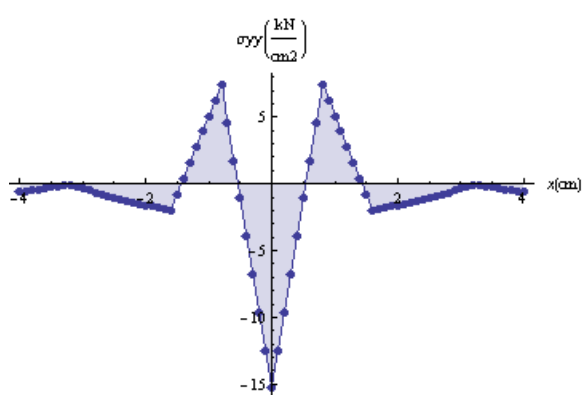
OPOMBA: T1-modra, T2-rdeča, T3-rumena



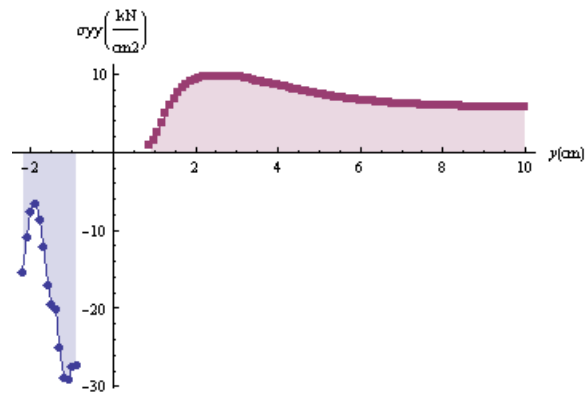
Slika 26: σ_{yy} po prerezu 1



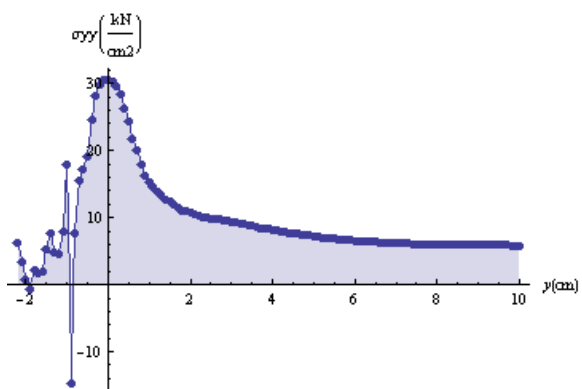
Slika 27: σ_{yy} po prerezu 2



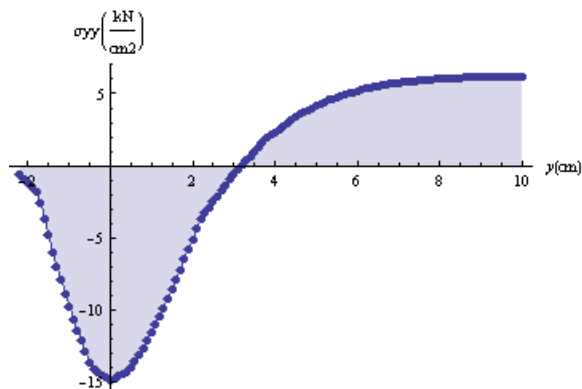
Slika 28: σ_{yy} po prerezu 3



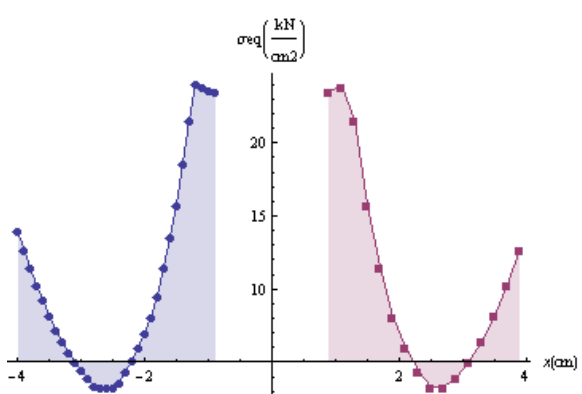
Slika 29: σ_{yy} po prerezu 4



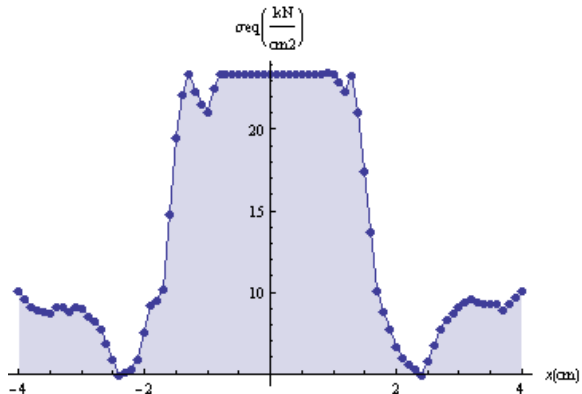
Slika 30: σ_{yy} po prerezu 5



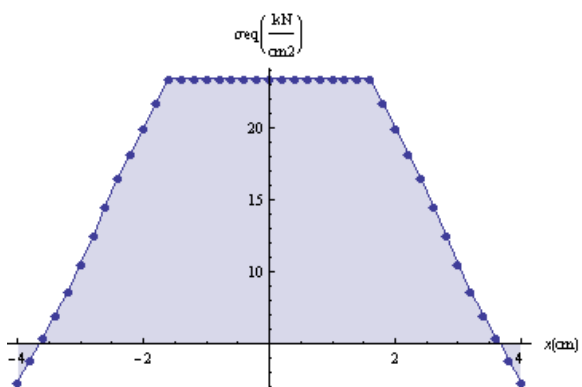
Slika 31: σ_{yy} po prerezu 6



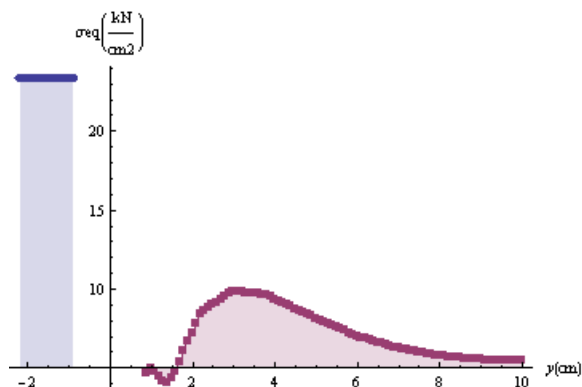
Slika 32: Misesova napetost po prerezu 1



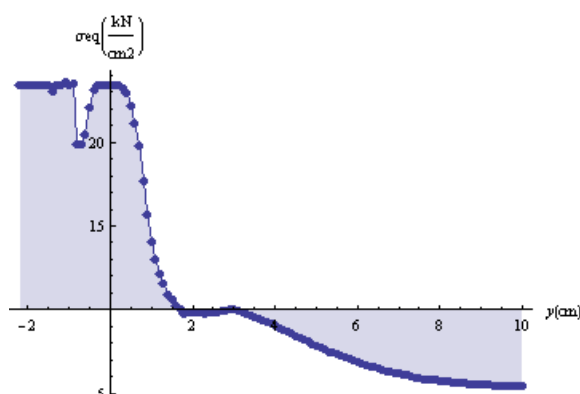
Slika 33: Misesova napetost po prerezu 2



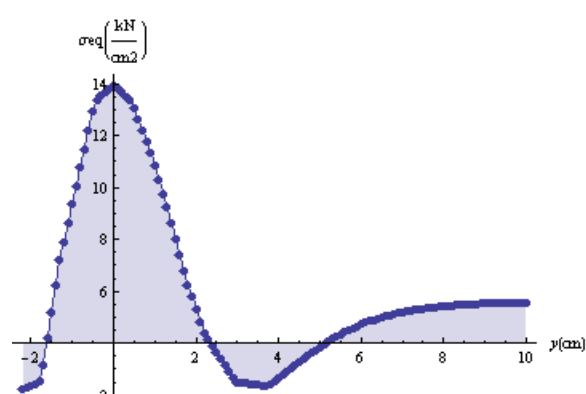
Slika 34: Misesova napetost po prerezu 3



Slika 35: Misesova napetost po prerezu 4



Slika 36: Misesova napetost po prerezu 5



Slika 37: Misesova napetost po prerezu 6

6.1.4 Mejne sile

Za primer 1 sem naredil še sedem variant analiz s programom AceFEM, pri katerih sem spreminjal različne parametre. Spreminjal sem gostoto mreže končnih elementov, ravninsko deformacijsko (RDS) ali ravninsko napetostno stanje (RNS) in funkcijo SmoothMesh, ki generira »boljšo« mrežo končnih elementov, ki se bolj prilega geometriji stika. Pri vseh analizah sem izpisal in primerjal mejno silo F_u (preglednica 1).

Preglednica 1: Mejne sile F_u

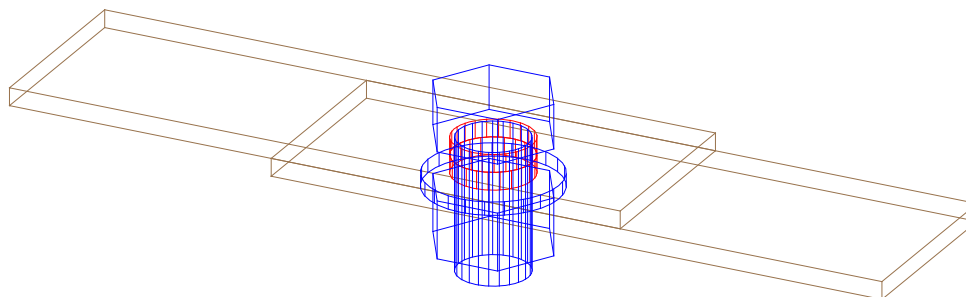
Varianta	Predpostavke v AceFEM-u	Mejna sila F_u [kN]
A	RDS, navadna mreža, SmoothMesh-izključen	19,73
B	RDS, gosta mreža, SmoothMesh-izključen	19,44
C	RNS, navadna mreža, SmoothMesh-izključen	17,33
D	RNS, gosta mreža, SmoothMesh-izključen	18,46
E	RDS, navadna mreža, SmoothMesh-vključen	19,94
F	RDS, gosta mreža, SmoothMesh-vključen	19,24
G	RNS, navadna mreža, SmoothMesh-vključen	18,74
H	RNS, gosta mreža, SmoothMesh-vključen	18,54
EN 1993-1-8	Merodajno: $V_{eff,1,k}$	23,88

Pri primeru 1 merodajno porušitev predstavlja strižni iztrg vijaka iz pločevine. Kot vidimo iz zgornje preglednice, se rezultati numeričnih analiz in rezultati računa po EN 1993-1-8 precej dobro ujemajo. Standard pri računu strižnega iztrga ne upošteva utrjevanja materiala, saj formula vsebuje trdnost na meji tečenja f_y . Pri vseh variantah numerične analize kjer sem predpostavil ravninsko napetostno stanje, sem dobil manjšo mejno silo F_u , kot pri variantah z ravninskim deformacijskim stanjem. Do tega pride, ker ravninsko deformacijsko stanje določa

da je deformacija $\varepsilon_{zz} = 0$ in s tem predpostavi konstanten prečni prerez pločevine, med deformiranjem v smeri delovanja obtežbe. Pri ravninskem deformacijskem stanju pride do nastanka prostorskega napetostnega stanja, ki poveča nosilnost materiala. Ravninsko napetostno stanje pa določa da je deformacija $\varepsilon_{zz} \neq 0$ in s tem upošteva kontrakcijo prečnega prereza pločevine, zaradi deformacije ε_{yy} . V teh primerih je bil čas analize veliko daljši, kot pri ravninskem deformacijskem stanju, ker predstavlja spreminjanje deformacije ε_{zz} zapleteno funkcijo. Skoraj pri vseh variantah numerične analize z gostejšo mrežo končnih elementov sem dobil manjšo mejno silo F_u , vendar pa se je s tem bistveno podaljšal čas analize. V vseh variantah analize z vključeno funkcijo SmoothMesh sem dobil večjo mejno silo F_u , ne glede na gostoto mreže oziroma na ravninsko deformacijsko ali ravninsko napetostno stanje.

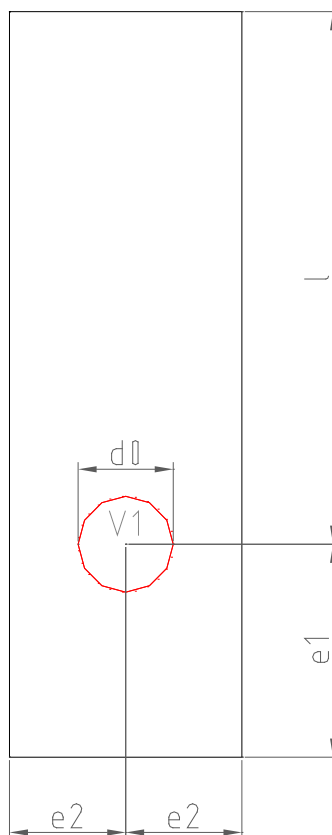
6.2 Primer 2-en vijak (nateg)

Računal sem mejno nosilnost natezno obremenjenega vijčenega stika, sestavljenega iz dveh simetričnih pločevin in enega vijaka (slika 38).



Slika 38: Skica primera 2

6.2.1 Geometrija pločevine



Slika 39: Geometrija pločevine primera 2

6.2.2 Račun nosilnosti po EN 1993-1-8

Jeklo: S235

Vijaki: M16 (8.8)

$$f_y = 23,5 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

$$f_{ub} = 80 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

$$th = 4 \text{ mm}$$

$$d = 16 \text{ mm}$$

$$d_0 = 18 \text{ mm}$$

$$e_1 = 40 \text{ mm}$$

$$e_2 = 22 \text{ mm}$$

$$l = 100 \text{ mm}$$

a) Strižna nosilnost vijaka

$$F_{v,k} = \alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A = 0,6 \cdot 80 \cdot 2,01 = 96,48 \text{ kN}$$

b) Kontrola bočnih pritiskov

$$F_{b,k} = 1,5 \cdot f_u \cdot d \cdot t = 1,5 \cdot 36 \cdot 1,6 \cdot 0,4 = 34,56 \text{ kN}$$

c) Kontrola bruto in neto prereza

$$N_{pl,k} = A \cdot f_y = 4,4 \cdot 0,4 \cdot 23,5 = 41,36 \text{ kN} \text{ -bruto prerez}$$

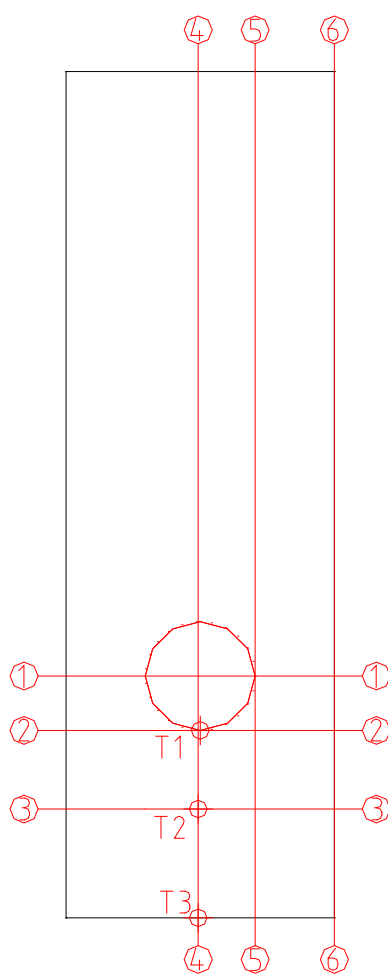
$$N_{u,k} = 0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u = 0,9 \cdot 2,6 \cdot 0,4 \cdot 36 = 33,70 \text{ kN} \text{ -neto prerez}$$

d) Strižni iztrg

$$V_{eff,1,k} = f_u \cdot A_{nt} + (1/\sqrt{3}) \cdot f_y \cdot A_{nv} = (1/\sqrt{3}) \cdot 23,5 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 0,4 = 43,42 \text{ kN}$$

6.2.3 Analiza s programom AceFEM

Med analizo sem poleg sile F izrisoval, v odvisnosti od pomika, tudi plastično deformacijo in Misesovo napetost v točkah na pločevini T1, T2 in T3 (slika 40). Po končani analizi pa sem izrisal grafe napetosti σ_{yy} in Misesove napetosti po prečnih in vzdolžnih prerezih pločevine (slika 40).

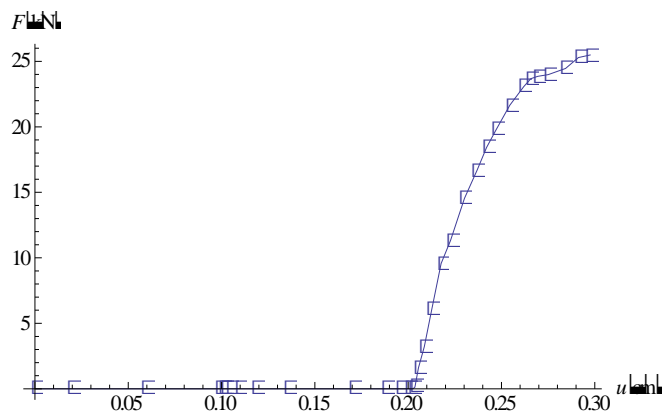


Slika 40: Točke in prerezi za primer 2

6.2.3.1 Varianta B

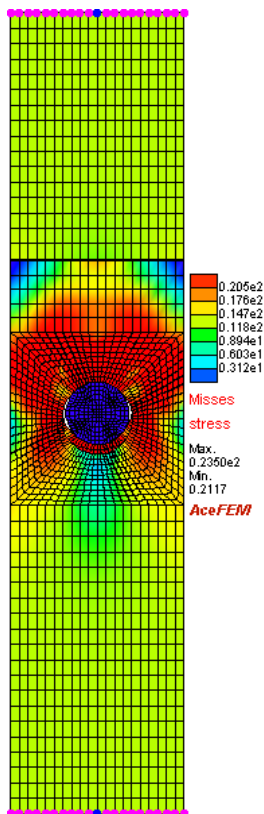
Predpostavke v AceFEM-u:

- ravninsko deformacijsko stanje
- večja gostota mreže
- funkcija SmoothMesh je izključena

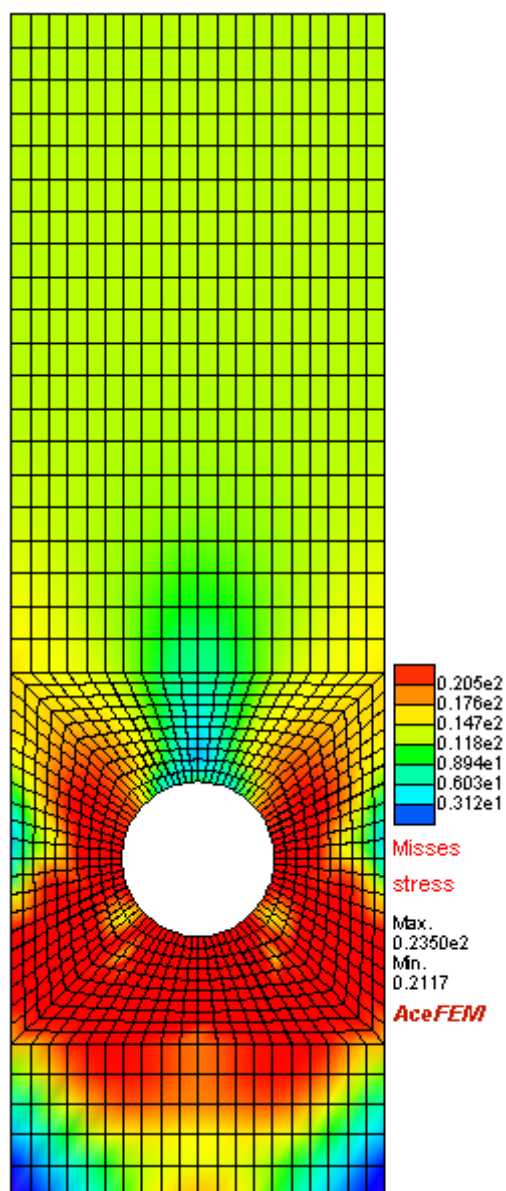


Slika 41: Sila-pomik

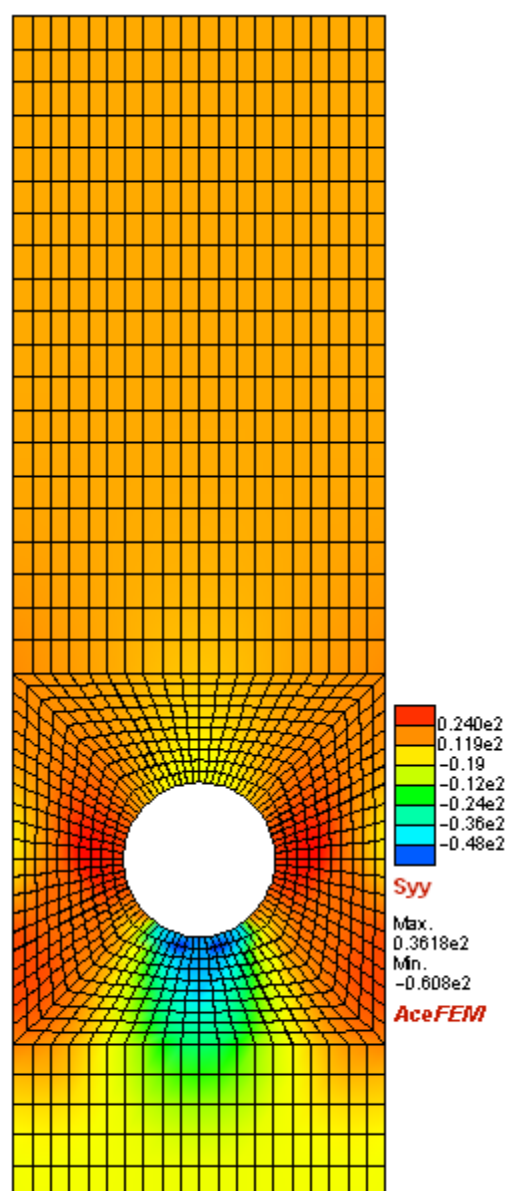
Mejna sila $F_u=25,54$ kN



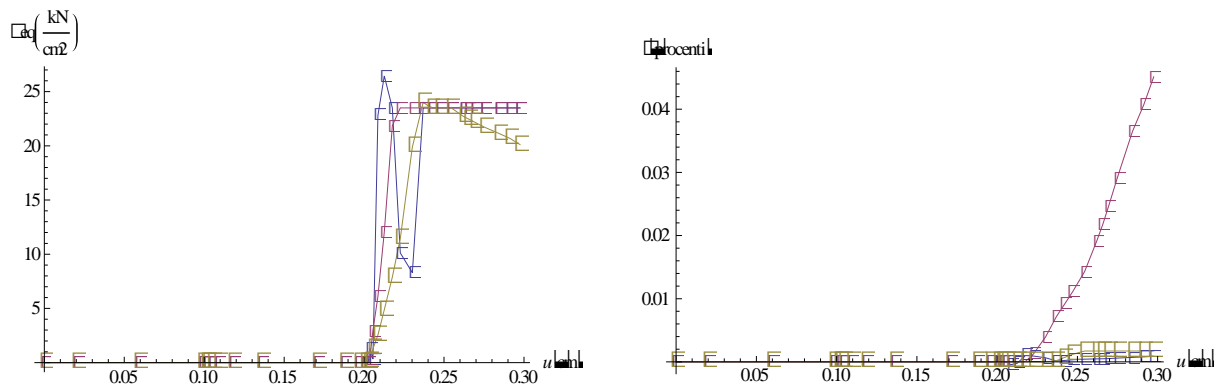
Slika 42: Misesova napetost po stiku



Slika 43: Misesova napetost po pločevini

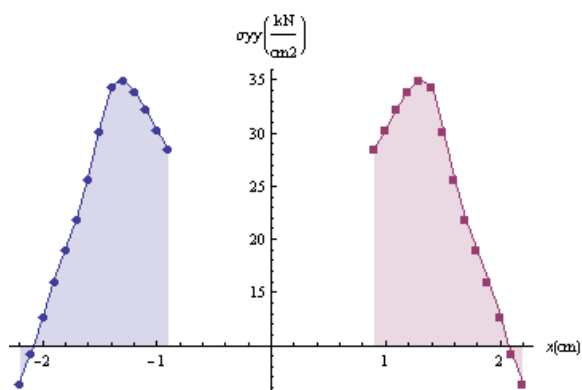


Slika 44: Napetost σ_{yy} po pločevini

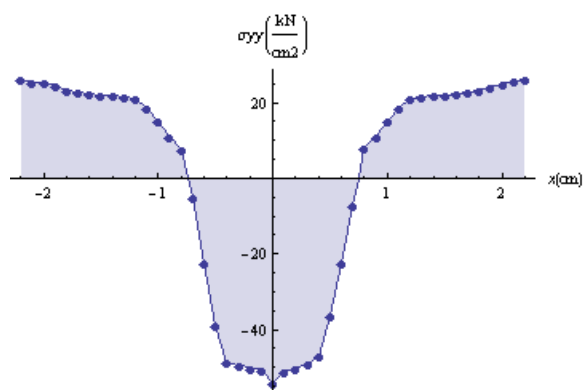


Slika 45: Misesova napetost in plastična deformacija v točkah T1, T2 in T3

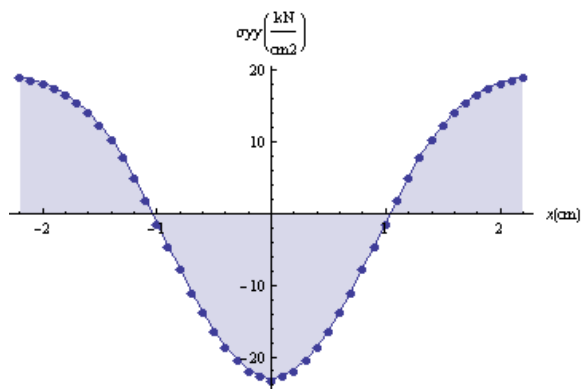
OPOMBA: T1-modra, T2-rdeča, T3-rumena



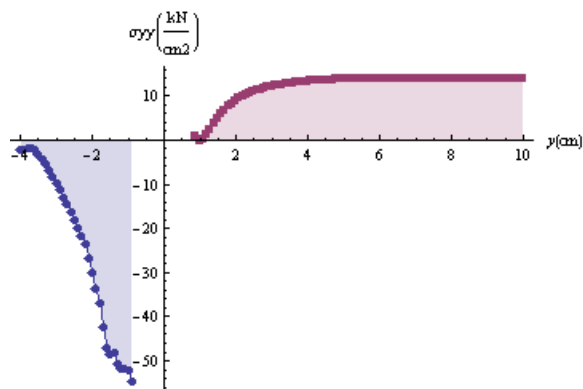
Slika 46: σ_{yy} po prerezu 1



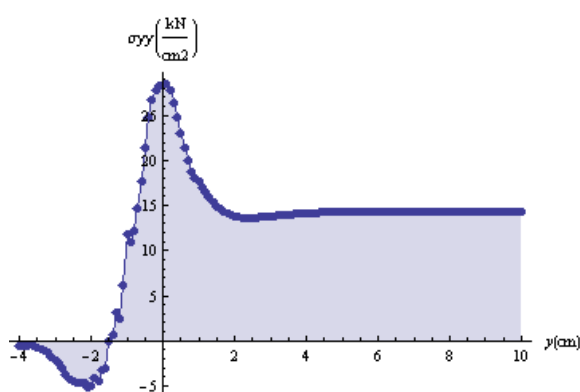
Slika 47: σ_{yy} po prerezu 2



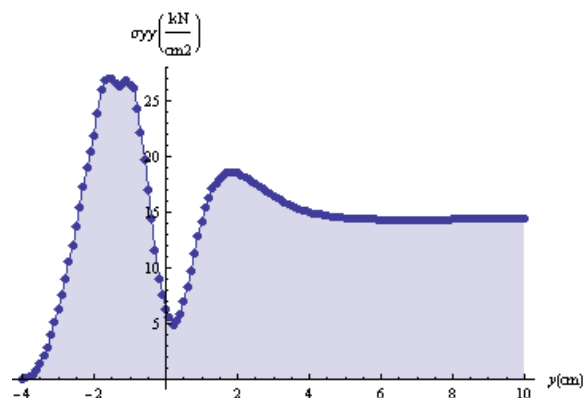
Slika 48: σ_{yy} po prerezu 3



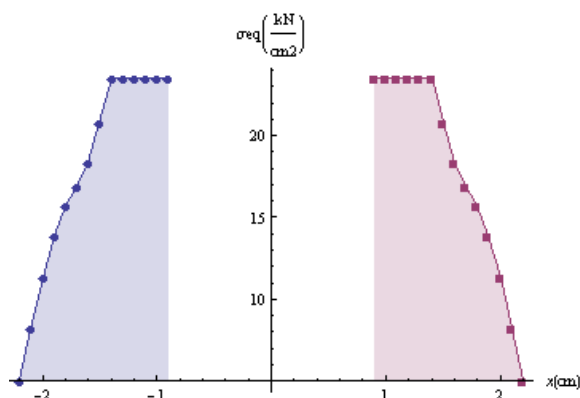
Slika 49: σ_{yy} po prerezu 4



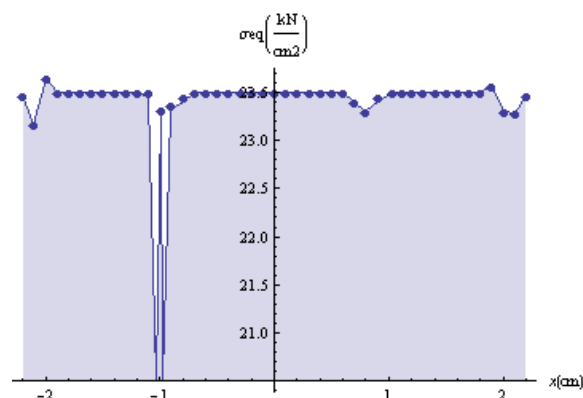
Slika 50: σ_{yy} po prerezu 5



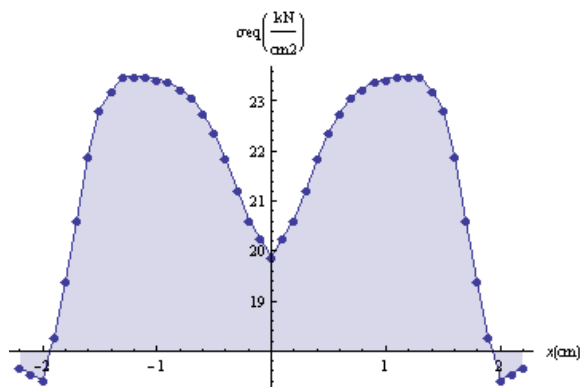
Slika 51: σ_{yy} po prerezu 6



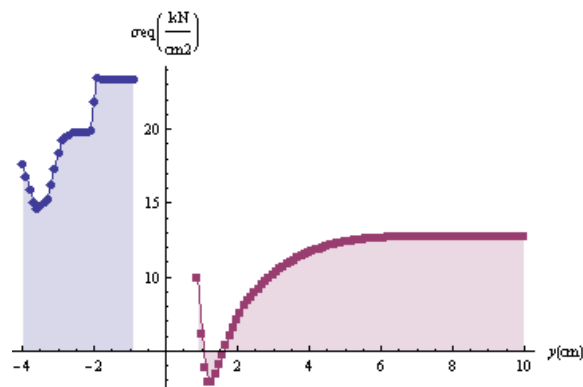
Slika 52: Misesova napetost po prerezu 1



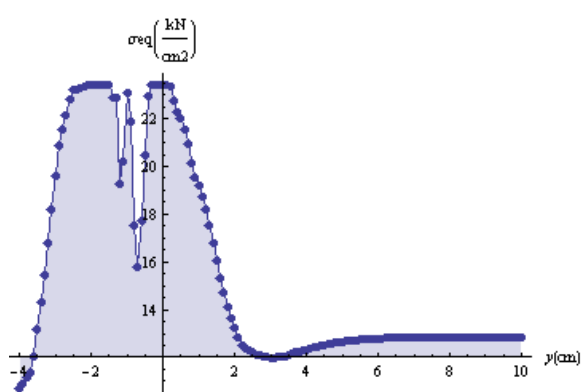
Slika 53: Misesova napetost po prerezu 2



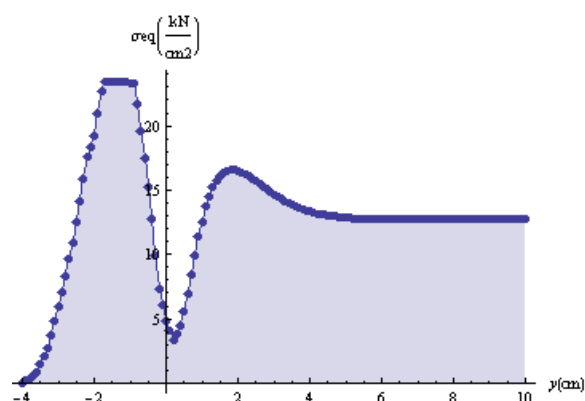
Slika 54: Misesova napetost po prerezu 3



Slika 55: Misesova napetost po prerezu 4



Slika 56: Misesova napetost po prerezu 5



Slika 57: Misesova napetost po prerezu 6

6.2.4 Mejne sile

Za primer 2 sem naredil še sedem variant analiz s programom AceFEM, pri katerih sem spreminjal različne parametre. Spreminjal sem gostoto mreže končnih elementov, ravninsko deformacijsko (RDS) ali ravninsko napetostno stanje (RNS) in funkcijo SmoothMesh, ki generira »boljšo« mrežo končnih elementov, ki se bolj prilega geometriji stika. Pri vseh analizah sem izpisal in primerjal mejno silo F_u (preglednica 2).

Preglednica 2: Mejne sile F_u

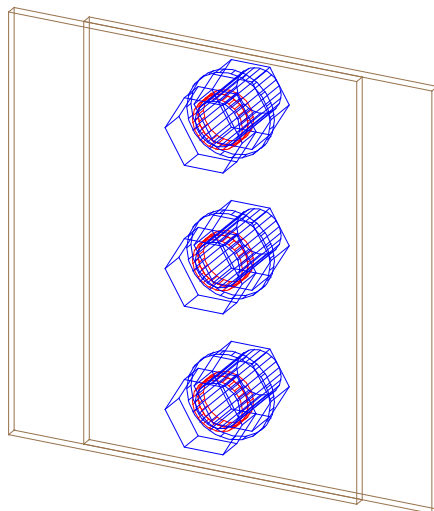
Varianta	Predpostavke v AceFEM-u	Mejna sila F_u [kN]
A	RDS, navadna mreža, SmoothMesh-izključen	27,19
B	RDS, gosta mreža, SmoothMesh-izključen	25,54
C	RNS, navadna mreža, SmoothMesh-izključen	23,64
D	RNS, gosta mreža, SmoothMesh-izključen	24,23
E	RDS, navadna mreža, SmoothMesh-vključen	27,87
F	RDS, gosta mreža, SmoothMesh-vključen	25,59
G	RNS, navadna mreža, SmoothMesh-vključen	24,41
H	RNS, gosta mreža, SmoothMesh-vključen	24,25
EN 1993-1-8	Merodajno: $N_{u,k}$	33,7

Pri primeru 2 merodajno porušitev predstavlja natezna porušitev po neto prerezu. Standard pri kontroli neto prereza upošteva utrjevanje materiala, saj formula vsebuje natezno trdnost f_u . Prav tako standard upošteva ugodne vplive prostorskega napetostnega stanja v okolici vijaka. Zaradi tega pride do razlike med rezultati numeričnih analiz in rezultati računa po EN 1993-1-8. Če bi v formuli za kontrolo neto prereza upoštevali napetost tečenja f_y namesto natezne trdnosti f_u , bi bili rezultati izračuna po standardu in rezultati numeričnih analiz zelo

podobni. Pri vseh variantah numerične analize kjer sem predpostavil ravninsko napetostno stanje, sem dobil manjšo mejno silo F_u , kot pri variantah z ravninskim deformacijskim stanjem. Do tega pride, ker ravninsko deformacijsko stanje določa da je deformacija $\varepsilon_{zz} = 0$ in s tem predpostavi konstanten prečni prerez pločevine, med deformiranjem v smeri delovanja obtežbe. Pri ravninskem deformacijskem stanju pride do nastanka prostorskega napetostnega stanja, ki poveča nosilnost materiala. Ravninsko napetostno stanje pa določa da je deformacija $\varepsilon_{zz} \neq 0$ in s tem upošteva kontrakcijo prečnega prereza pločevine, zaradi deformacije ε_{yy} . V teh primerih je bil čas analize veliko daljši, kot pri ravninskem deformacijskem stanju, ker predstavlja spreminjanje deformacije ε_{zz} zapleteno funkcijo. Pri vseh variantah numerične analize, kjer sem uporabil gostejšo mrežo končnih elementov sem dobil manjšo mejno silo F_u , vendar pa se je s tem bistveno podaljšal čas analize. V vseh variantah analize z vključeno funkcijo SmoothMesh sem dobil večjo mejno silo F_u , ne glede na gostoto mreže oziroma na ravninsko deformacijsko ali ravninsko napetostno stanje.

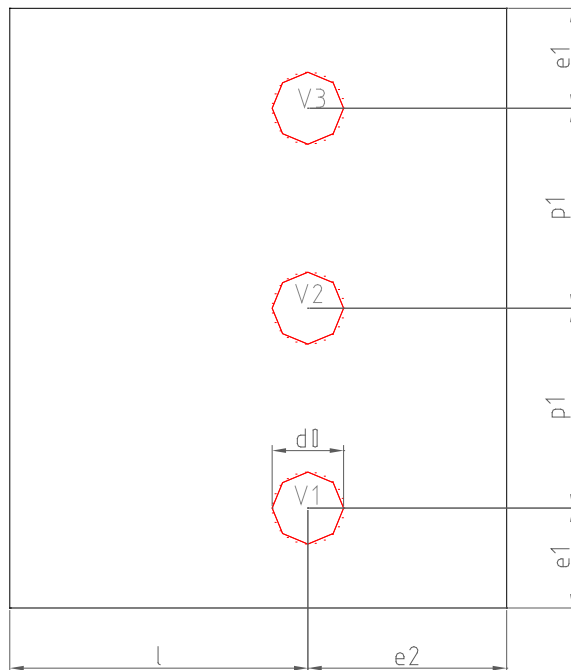
6.3 Primer 3-trije vijaki (strig)

Računal sem mejno nosilnost strižno obremenjenega vijčenega stika, sestavljenega iz dveh simetričnih pločevin in treh vijakov (slika 58).



Slika 58: Skica primera 3

6.3.1 Geometrija pločevine



Slika 59: Geometrija pločevine primera 3

6.3.2 Račun nosilnosti po EN 1993-1-8

Jeklo: S235

Vijaki: M16 (8.8)

$$f_y = 23,5 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

$$f_{ub} = 80 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

$$t_h = 4 \text{ mm}$$

$$d = 16 \text{ mm}$$

$$d_0 = 18 \text{ mm}$$

$$e_1 = 25 \text{ mm}$$

$$p_1 = 50 \text{ mm}$$

$$e_2 = 50 \text{ mm}$$

$$l = 75 \text{ mm}$$

$$\frac{d}{t_w} = \frac{15}{0,4} = 37,5 < 72 \cdot \varepsilon$$

-prerez spada v 1. razred kompaktnosti

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$$

a) Strižna nosilnost vijakov

$$F_{V,k} = \alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A = 0,6 \cdot 80 \cdot 2,01 = 96,48 \text{ kN}$$

$$\sum F_{v,k} = n \cdot F_{v,k} = 3 \cdot 96,48 = 289,44 \text{ kN}$$

b) Kontrola bočnih pritiskov

-Robni vijaki

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{80}{36} = 2,22 \\ 1,0 \\ \frac{e_1}{3 \cdot d_0} = \frac{25}{3 \cdot 18} = 0,46 \end{array} \right\}$$

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \cdot \frac{50}{18} - 1,7 = 6,07 \\ 2,5 \end{array} \right\}$$

$$F_{b,k(\text{robni})} = k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t = 2,5 \cdot 0,46 \cdot 36 \cdot 1,6 \cdot 0,4 = 26,49 \text{ kN}$$

-Notranji vijaki

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{80}{36} = 2,22 \\ 1,0 \\ \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4} = \frac{50}{3 \cdot 18} - \frac{1}{4} = 0,68 \end{array} \right\}$$

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = / \\ 2,5 \end{array} \right\}$$

$$F_{b,k(\text{notranji})} = k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t = 2,5 \cdot 0,68 \cdot 36 \cdot 1,6 \cdot 0,4 = 39,17 \text{ kN}$$

-Celoten stik

$$\sum F_{b,k} = n_n \cdot F_{b,k(\text{notranji})} + n_r \cdot F_{b,k(\text{robni})} = 1 \cdot 39,17 + 2 \cdot 26,49 = 92,15 \text{ kN}$$

c) Strižni iztrg

$$V_{\text{eff},1,k} = f_u \cdot A_{nt} + (1/\sqrt{3}) \cdot f_y \cdot A_{nv} = 36 \cdot 4,1 \cdot 0,4 + (1/\sqrt{3}) \cdot 23,5 \cdot 8 \cdot 0,4 = 102,46 \text{ kN}$$

d) Strig

$$V_{pl,k} = A_v \cdot (f_y / \sqrt{3}) = 3,84 \cdot (23,5 / \sqrt{3}) = 52,1 \text{ kN}$$

e) Upogib

$$W_{pl} = \frac{b \cdot h^2}{4} = \frac{0,4 \cdot 15^2}{4} = 22,5 \text{ cm}^2$$

$$V_{pl,k} = f_y \cdot A_v \cdot (1/\sqrt{3}) = 23,5 \cdot 6 \cdot (1/\sqrt{3}) = 81,41 \text{ kN}$$

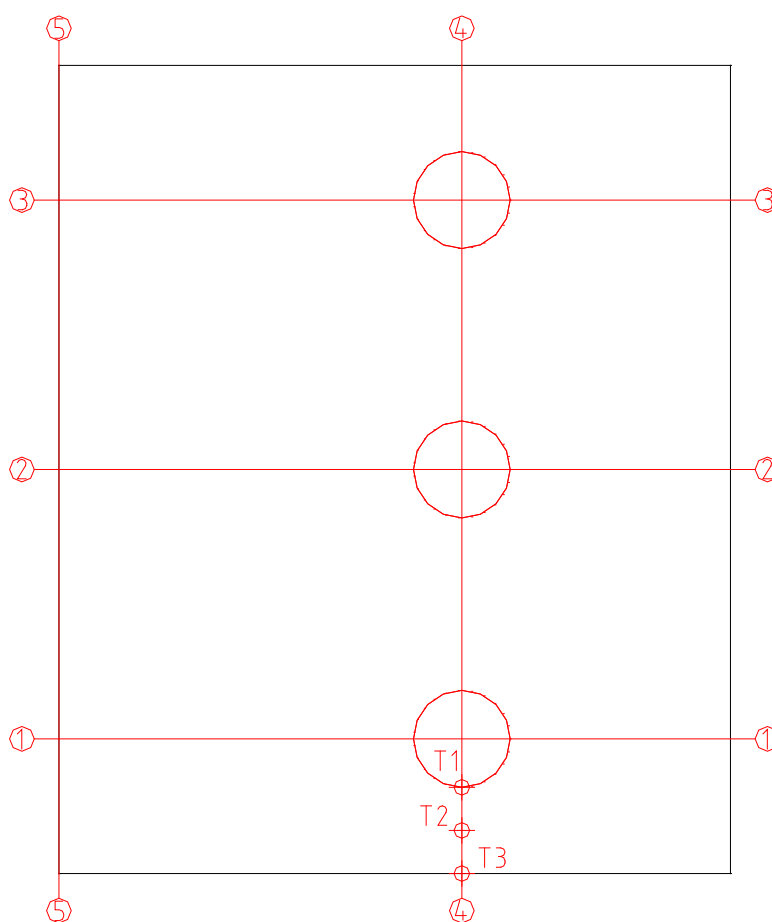
$$\rho = \left(\frac{2 \cdot V_{Ed}}{V_{pl,k}} - 1 \right)^2 = \left(\frac{2 \cdot 52,1}{81,41} - 1 \right)^2 = 0,078$$

$$f_y' = (1 - \rho) \cdot f_y = (1 - 0,078) \cdot 23,5 = 21,67 \text{ kN / cm}^2$$

$$M = f_y' \cdot W_{pl} = 21,67 \cdot 22,5 = 487,57 \text{ kNcm}$$

6.3.3 Analiza s programom AceFEM

Med analizo sem poleg sile F izrisoval, v odvisnosti od pomika, tudi plastično deformacijo in Misesovo napetost v točkah na pločevini T1, T2 in T3 (slika 60). Po končani analizi pa sem izrisal grafe napetosti σ_{yy} , σ_{xx} , σ_{xy} in Misesove napetosti po prečnih in vzdolžnih prerezih pločevine (slika 60). Na koncu sem izrisal tudi graf sil v vijakih.

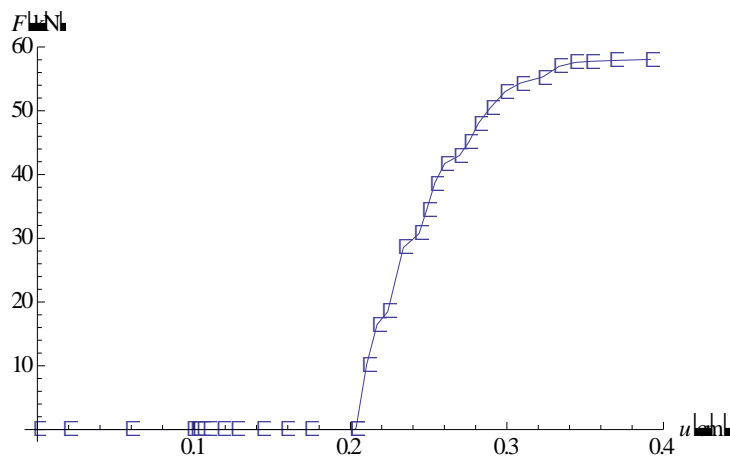


Slika 60: Točke in prerezi za primer 3

6.3.3.1 Varianta C

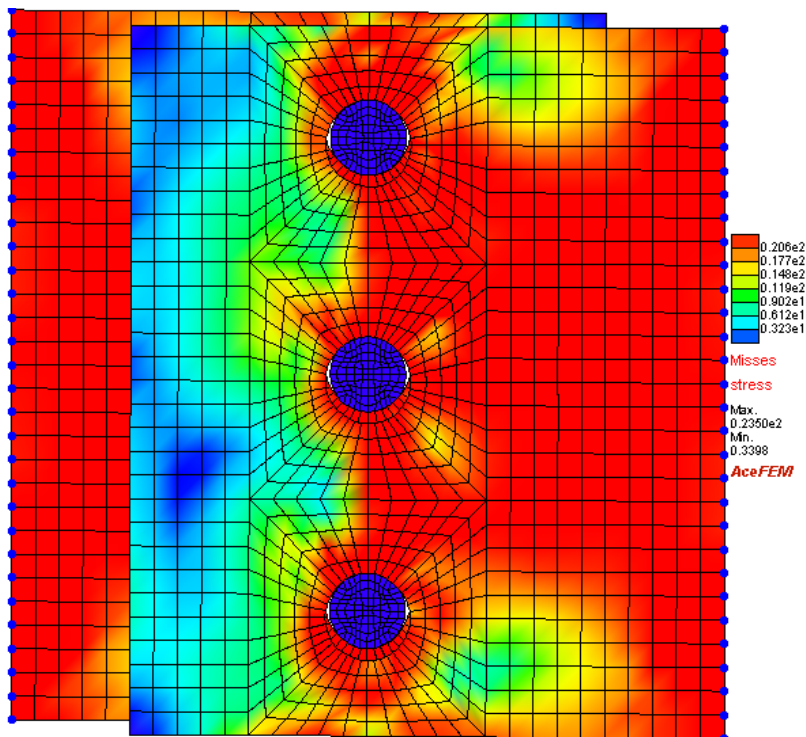
Predpostavke v AceFEM-u:

- ravninsko napetostno stanje
- navadna gostota mreže
- funkcija SmoothMesh je izključena

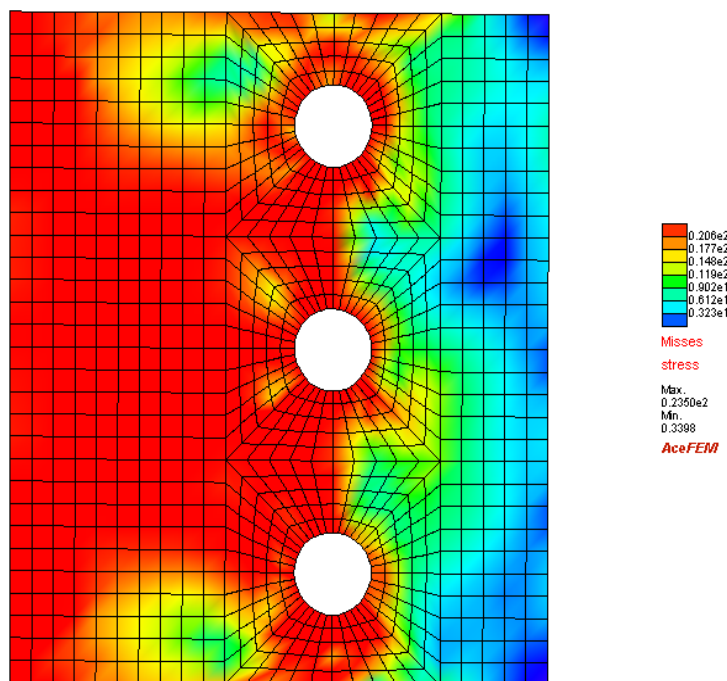


Slika 61: Sila-pomik

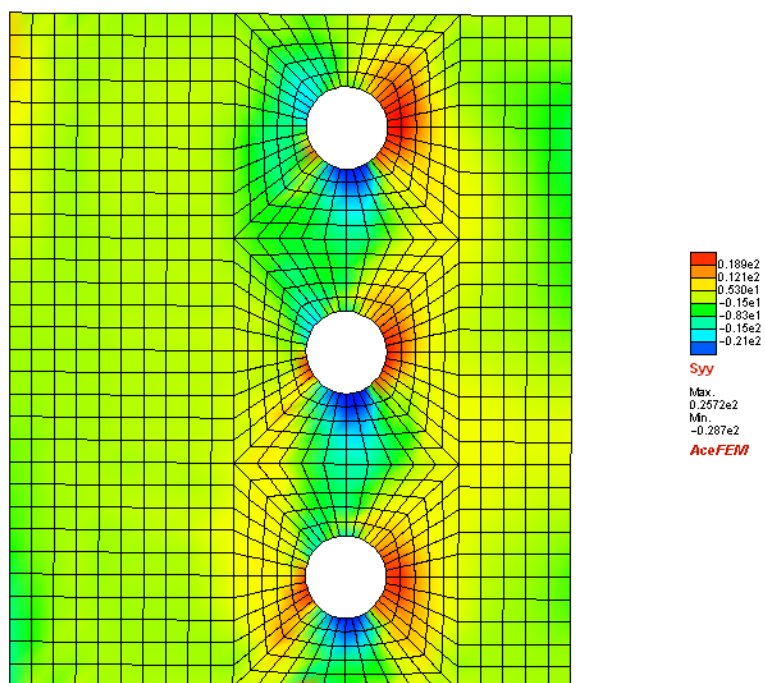
Mejna sila $F_u=58,12\text{kN}$



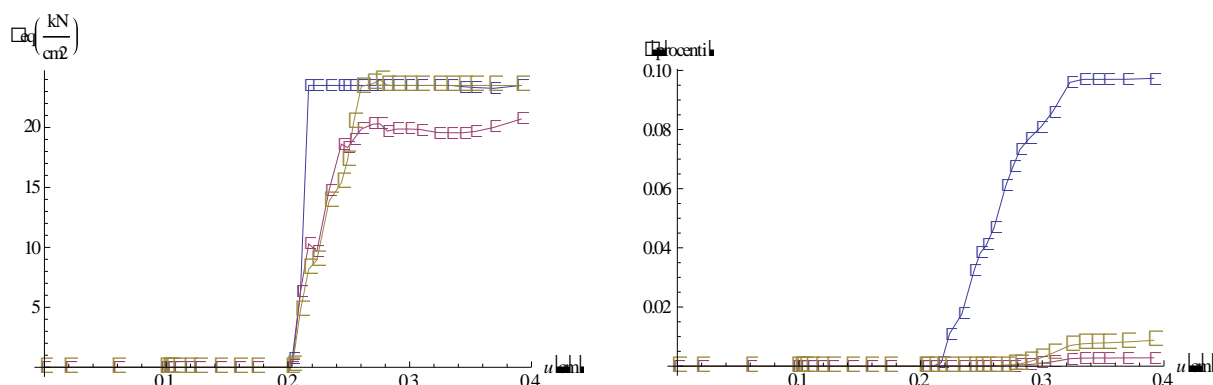
Slika 62: Misesova napetost po stiku



Slika 63: Misesova napetost po pločevini

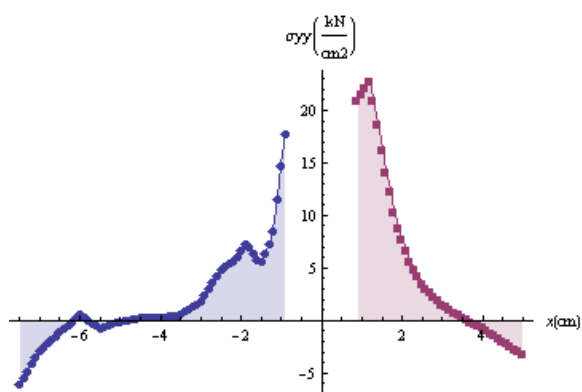


Slika 64: Napetost σ_{yy} po pločevini

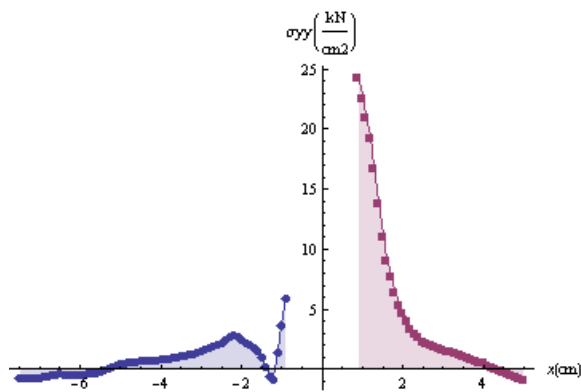


Slika 65: Misesova napetost in plastična deformacija v točkah T1, T2 in T3

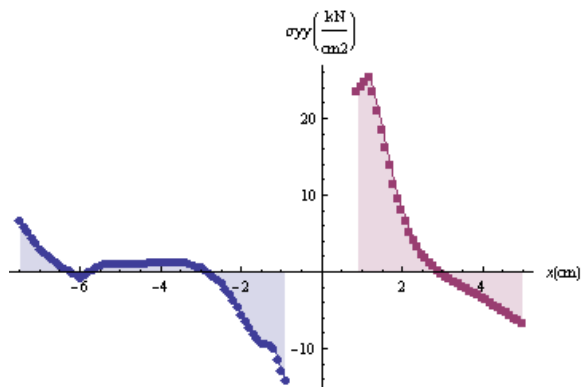
OPOMBA: T1-modra, T2-rdeča, T3-rumena



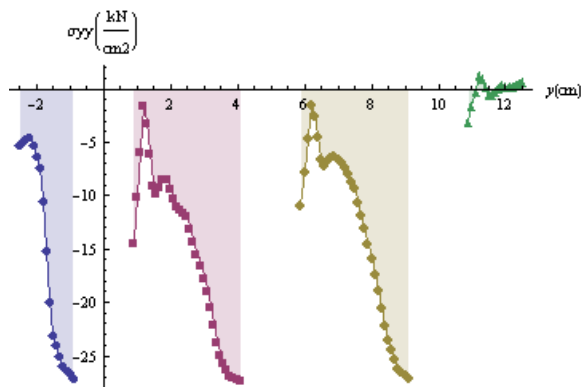
Slika 66: σ_{yy} po prerezu 1



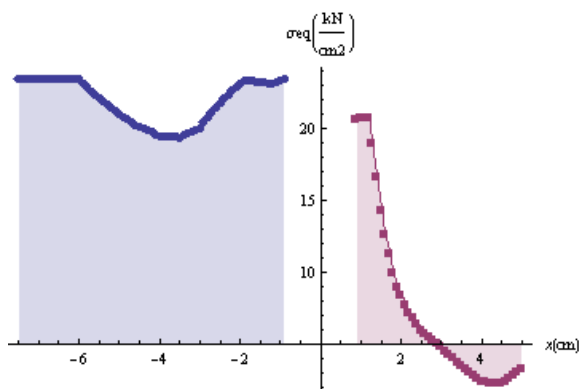
Slika 67: σ_{yy} po prerezu 2



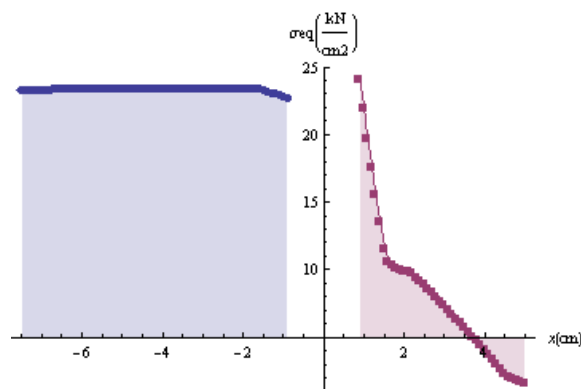
Slika 68: σ_{yy} po prerezu 3



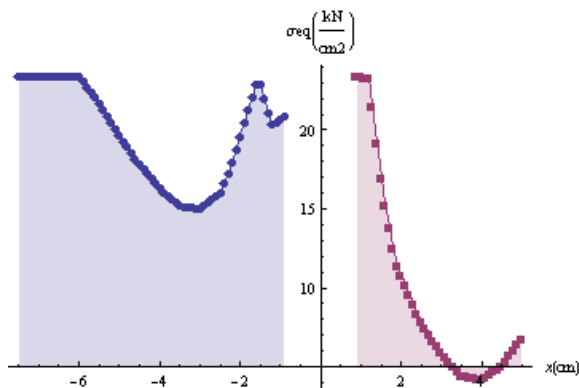
Slika 69: σ_{yy} po prerezu 4



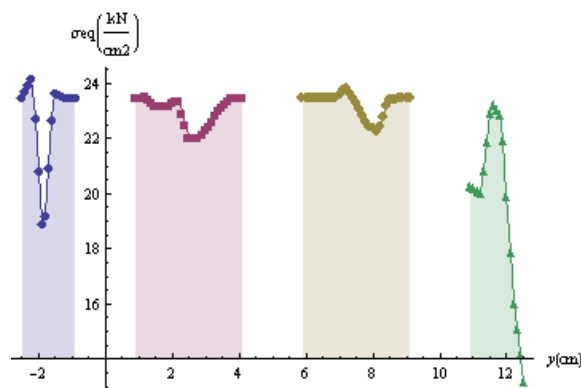
Slika 70: Misesova napetost po prerezu 1



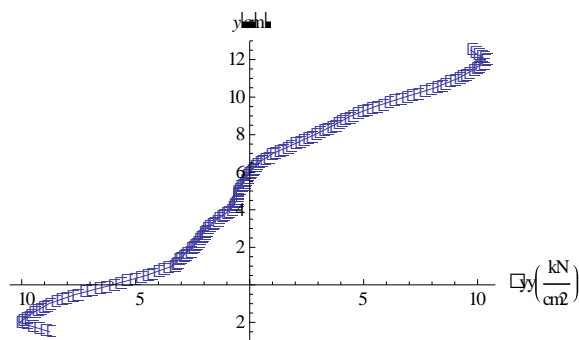
Slika 71: Misesova napetost po prerezu 2



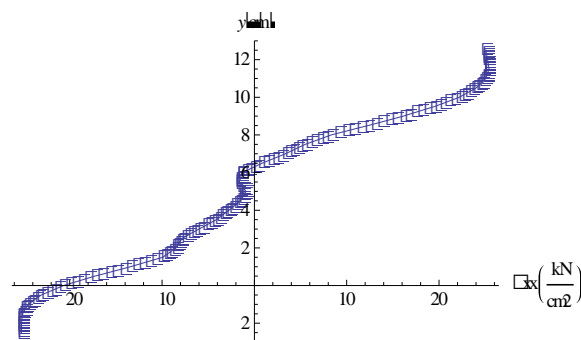
Slika 72: Misesova napetost po prerezu 3



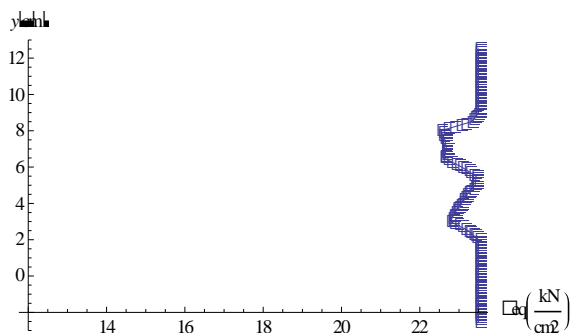
Slika 73: Misesova napetost po prerezu 4



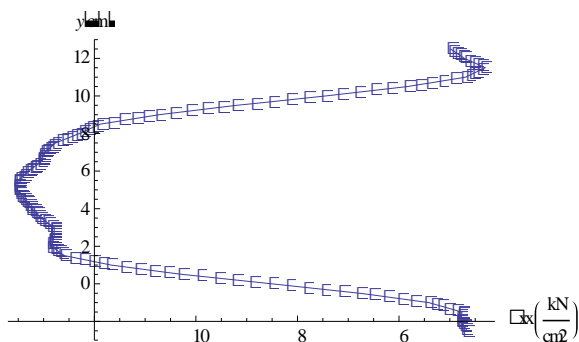
Slika 74: σ_{yy} po prerezu 5



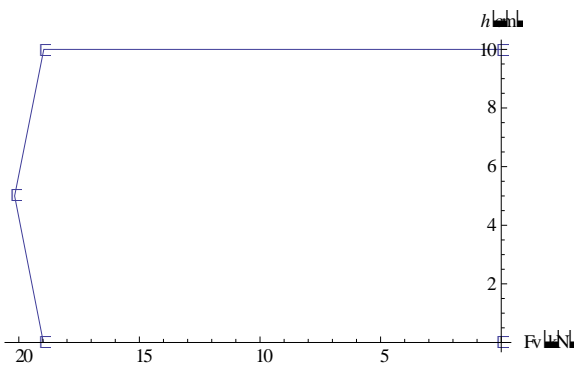
Slika 75: σ_{xx} po prerezu 5



Slika 76: Misesova napetost po prerezu 5



Slika 77: σ_{xy} po prerezu 5



Slika 78: Sile v vijakih V1,V2,V3

6.3.4 Mejne sile

Za primer 3 sem naredil še sedem variant analiz s programom AceFEM, pri katerih sem spreminjal različne parametre. Spreminjal sem gostoto mreže končnih elementov, ravninsko deformacijsko (RDS) ali ravninsko napetostno stanje (RNS) in funkcijo SmoothMesh, ki generira »boljšo« mrežo končnih elementov, ki se bolj prilega geometriji stika. Pri vseh analizah sem izpisal in primerjal mejno silo F_u (preglednica 3).

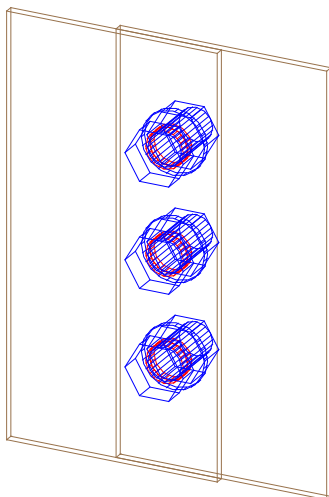
Preglednica 3: Mejne sile F_u

Varianta	Predpostavke v AceFEM-u	Mejna sila F_u [kN]
A	RDS, navadna mreža, SmoothMesh-izključen	58,64
B	RDS, gosta mreža, SmoothMesh-izključen	55,95
C	RNS, navadna mreža, SmoothMesh-izključen	58,12
D	RNS, gosta mreža, SmoothMesh-izključen	55,94
E	RDS, navadna mreža, SmoothMesh-vključen	56,12
F	RDS, gosta mreža, SmoothMesh-vključen	54,74
G	RNS, navadna mreža, SmoothMesh-vključen	56,83
H	RNS, gosta mreža, SmoothMesh-vključen	57,00
EN 1993-1-8	Merodajno: $V_{pl,k}$	52,1

Pri primeru 3 merodajno porušitev predstavlja strižna porušitev po neto prerezu. Standard pri strižni kontroli neto prereza ne upošteva utrjevanje materiala, saj formula vsebuje napetost tečenja f_y . Zaradi tega so razlike med rezultati numeričnih analiz in rezultati računa po EN 1993-1-8 majhne. Pri variantah numerične analize z vključeno funkcijo SmoothMesh, sem v primeru ravninskega deformacijskega stanja dobil višje vrednosti mejne sile F_u , kot pri ravninskem napetostnem stanju. Pri variantah z izključeno funkcijo SmoothMesh, pa sem v primeru ravninskega deformacijskega stanja dobil nižje vrednosti mejne sile F_u , kot pri ravninskem napetostnem stanju. Pri vseh variantah numerične analize, kjer sem uporabil gostejšo mrežo končnih elementov sem dobil manjšo mejno silo F_u , izjemi sta le primera G in H. Sile v vijakih so enakomerne.

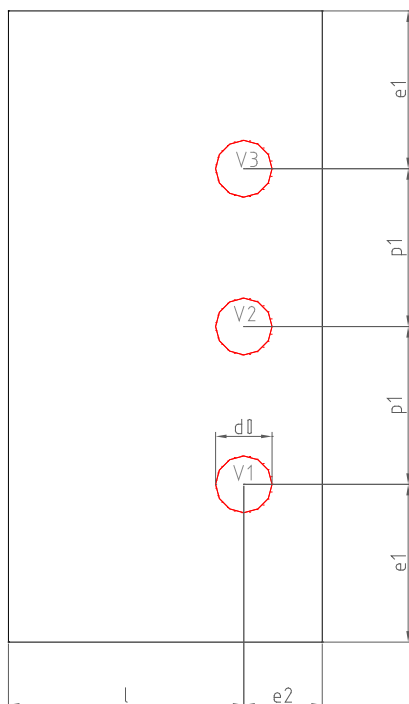
6.4 Primer 4-trije vijaki (strig)

Računal sem mejno nosilnost strižno obremenjenega vijčenega stika, sestavljenega iz dveh simetričnih pločevin in treh vijakov (slika 79).



Slika 79: Skica primera 4

6.4.1 Geometrija pločevine



Slika 80: Geometrija pločevine primera 4

6.4.2 Račun nosilnosti po EN 1993-1-8

Jeklo: S235

Vijaki: M16 (8.8)

$$f_y = 23,5 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

$$f_{ub} = 80 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

$$t_h = 4 \text{ mm}$$

$$d = 16 \text{ mm}$$

$$d_0 = 18 \text{ mm}$$

$$e_1 = 50 \text{ mm}$$

$$p_1 = 50 \text{ mm}$$

$$e_2 = 25 \text{ mm}$$

$$l = 75 \text{ mm}$$

$$\frac{d}{t_w} = \frac{20}{0,4} = 50,0 < 72 \cdot \varepsilon$$

-prerez spada v 1. razred kompaktnosti

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1$$

a) Strižna nosilnost vijakov

$$F_{v,k} = \alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A = 0,6 \cdot 80 \cdot 2,01 = 96,48 \text{ kN}$$

$$\sum F_{v,k} = n \cdot F_{v,k} = 3 \cdot 96,48 = 289,44 \text{ kN}$$

b) Kontrola bočnih pritiskov

-Robni vijaki

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{80}{36} = 2,22 \\ 1,0 \\ \frac{e_1}{3 \cdot d_0} = \frac{50}{3 \cdot 18} = 0,92 \end{array} \right\}$$

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \cdot \frac{25}{18} - 1,7 = 2,19 \\ 2,5 \end{array} \right\}$$

$$F_{b,k(\text{robni})} = k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t = 2,19 \cdot 0,92 \cdot 36 \cdot 1,6 \cdot 0,4 = 46,42 \text{ kN}$$

-Notranji vijaki

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{80}{36} = 2,22 \\ 1,0 \\ \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4} = \frac{50}{3 \cdot 18} - \frac{1}{4} = 0,68 \end{array} \right\}$$

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = / \\ 2,5 \end{array} \right\}$$

$$F_{b,k(\text{notranji})} = k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t = 2,5 \cdot 0,68 \cdot 36 \cdot 1,6 \cdot 0,4 = 39,17 \text{ kN}$$

-Celoten stik

$$\sum F_{b,k} = n_n \cdot F_{b,k(\text{notranji})} + n_r \cdot F_{b,k(\text{robni})} = 1 \cdot 39,17 + 2 \cdot 46,42 = 132,01 \text{ kN}$$

c) Strižni iztrg

$$V_{\text{eff},1,k} = f_u \cdot A_{nt} + (1/\sqrt{3}) \cdot f_y \cdot A_{nv} = 36 \cdot 1,6 \cdot 0,4 + (1/\sqrt{3}) \cdot 23,5 \cdot 10,5 \cdot 0,4 = 80,02 \text{ kN}$$

d) Strig

$$V_{pl,k} = A_v \cdot (f_y / \sqrt{3}) = 5,84 \cdot (23,5 / \sqrt{3}) = 81,04 \text{ kN}$$

e) Upogib

$$W_{pl} = \frac{b \cdot h^2}{4} = \frac{0,4 \cdot 20^2}{4} = 40,0 \text{ cm}^2$$

$$V_{pl,k} = f_y \cdot A_v \cdot (1/\sqrt{3}) = 23,5 \cdot 8 \cdot (1/\sqrt{3}) = 108,54 \text{ kN}$$

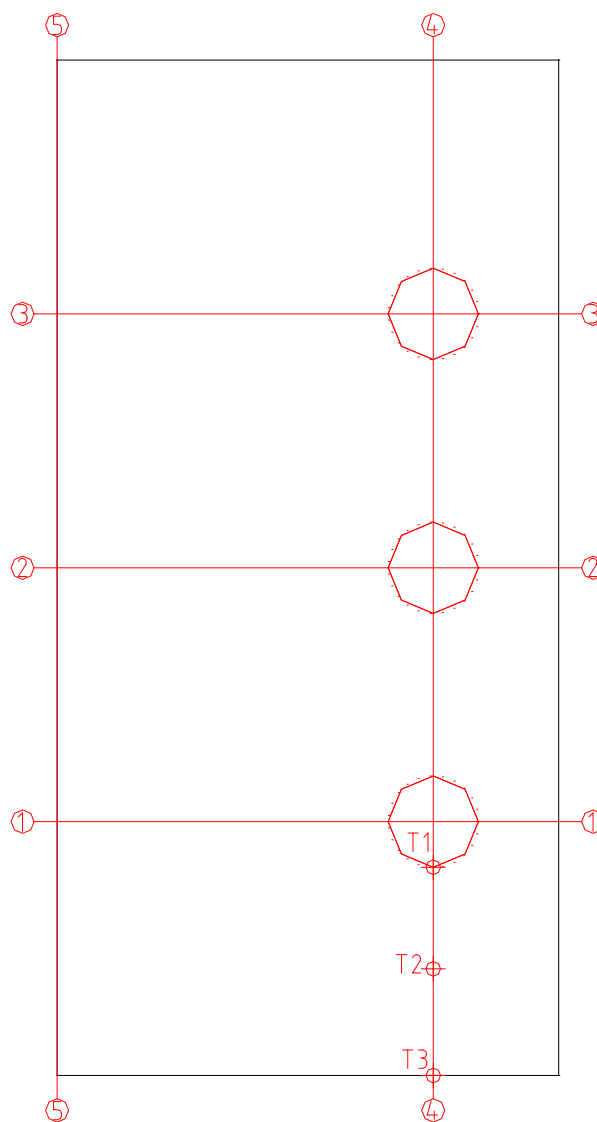
$$\rho = \left(\frac{2 \cdot V_{Ed}}{V_{pl,k}} - 1 \right)^2 = \left(\frac{2 \cdot 79,24}{108,54} - 1 \right)^2 = 0,21$$

$$f_y' = (1 - \rho) \cdot f_y = (1 - 0,21) \cdot 23,5 = 18,56 \text{ kN / cm}^2$$

$$M = f_y' \cdot W_{pl} = 18,56 \cdot 40,0 = 742,4 \text{ kNcm}$$

6.4.3 Analiza s programom AceFEM

Med analizo sem poleg sile F izrisoval, v odvisnosti od pomika, tudi plastično deformacijo in Misesovo napetost v točkah na pločevini T1, T2 in T3 (slika 81). Po končani analizi pa sem izrisal grafe napetosti σ_{yy} , σ_{xx} , σ_{xy} in Misesove napetosti po prečnih in vzdolžnih prerezih pločevine (slika 81). Na koncu sem izrisal tudi graf sil v vijakih.

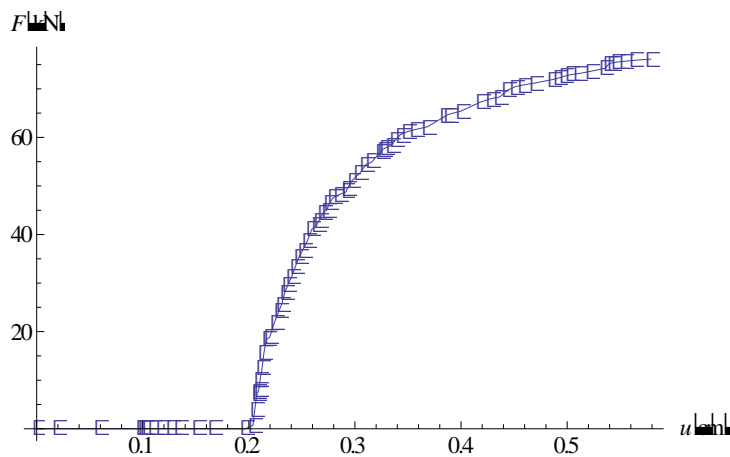


Slika 81: Točke in prerezi za primer 4

6.4.3.1 Varianta D

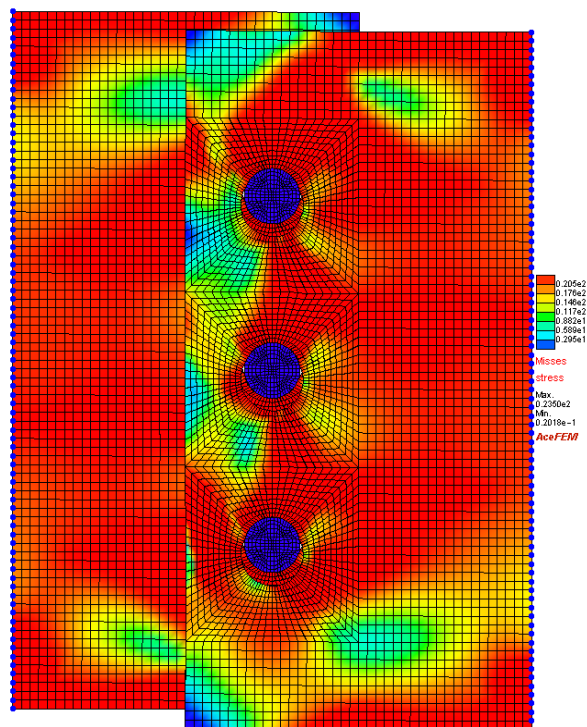
Predpostavke v AceFEM-u:

- ravninsko napetostno stanje
- večja gostota mreže
- funkcija SmoothMesh je izključena

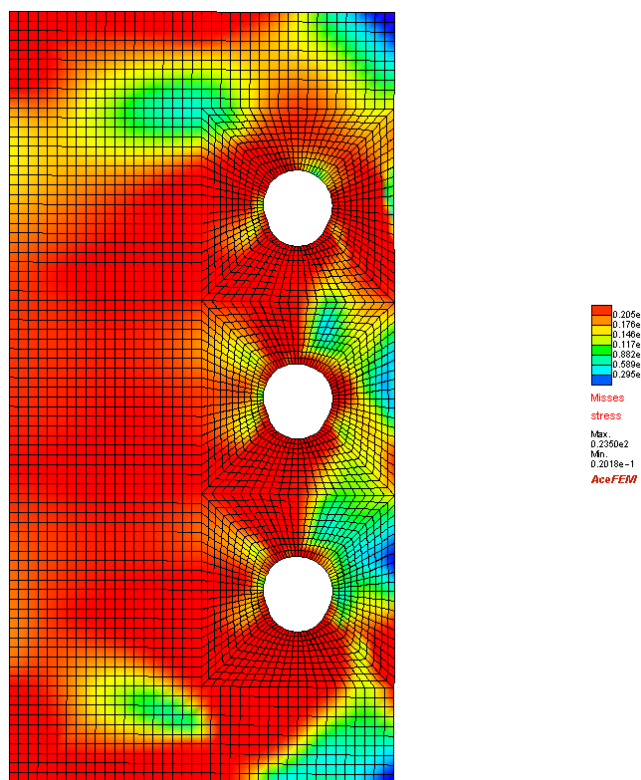


Slika 82: Sila-pomik

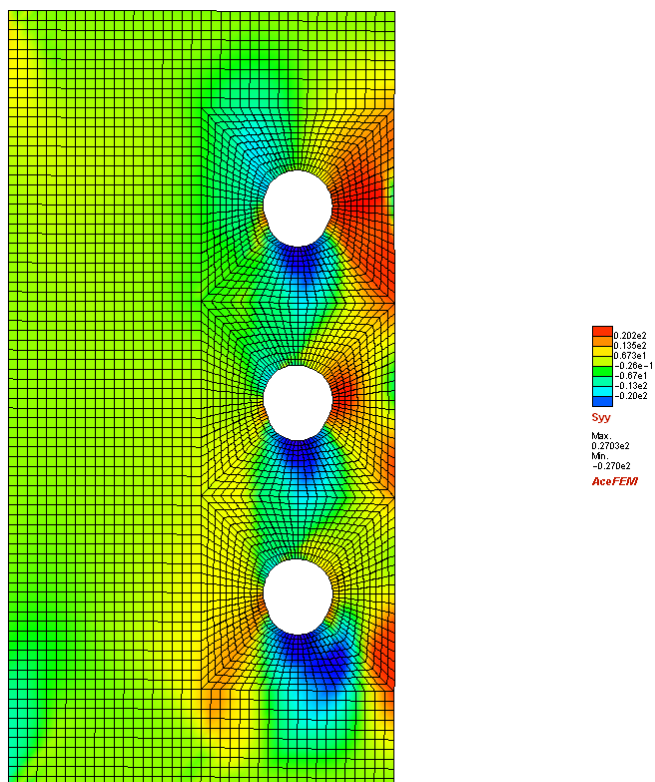
Mejna sila $F_u=76,44\text{kN}$



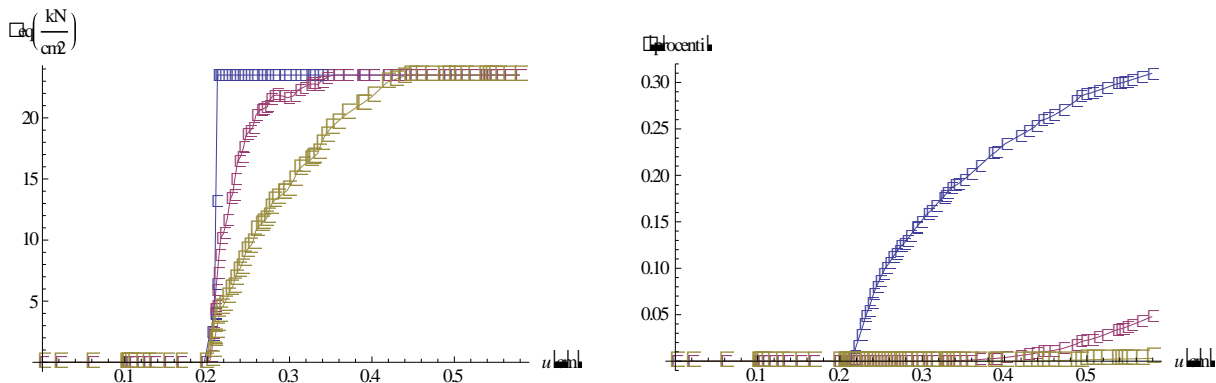
Slika 83: Misesova napetost po stiku



Slika 84: Misesova napetost po pločevini

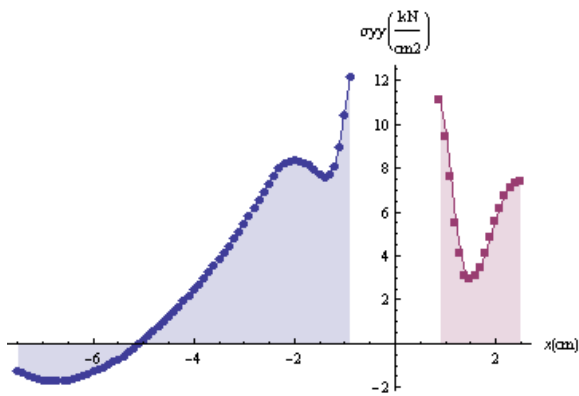


Slika 85: Napetost σ_{yy} po pločevini

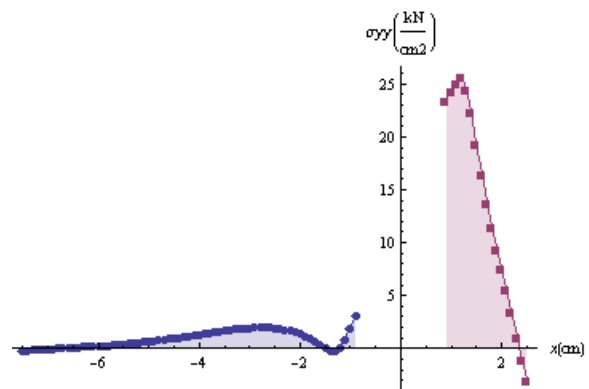


Slika 86: Misesova napetost in plastična deformacija v točkah T1, T2 in T3

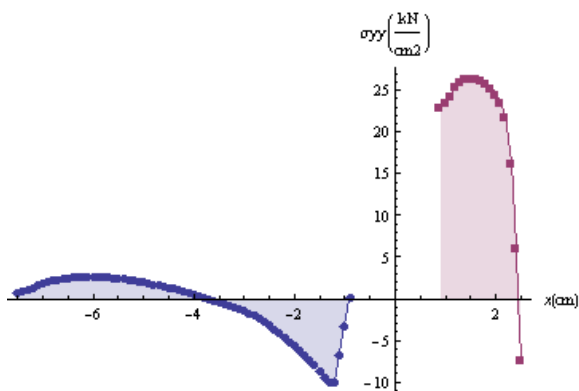
OPOMBA: T1-modra, T2-rdeča, T3-rumena



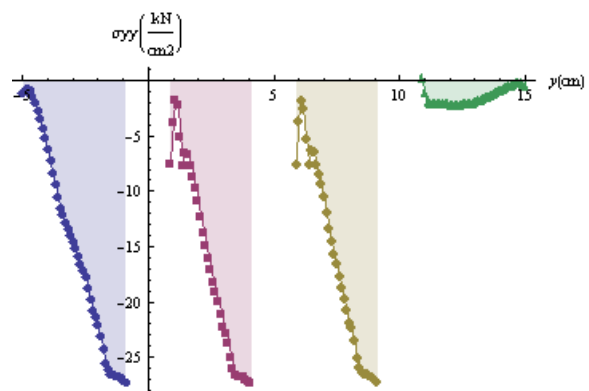
Slika 87: σ_{yy} po prerezu 1



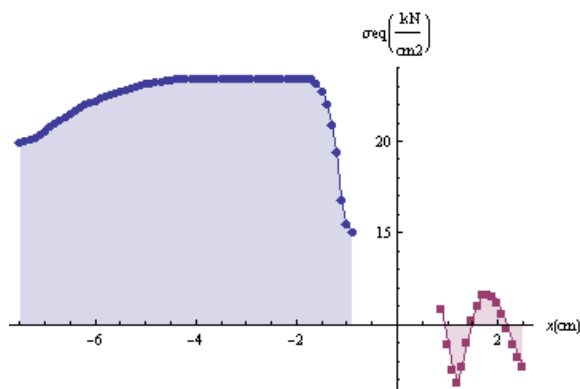
Slika 88: σ_{yy} po prerezu 2



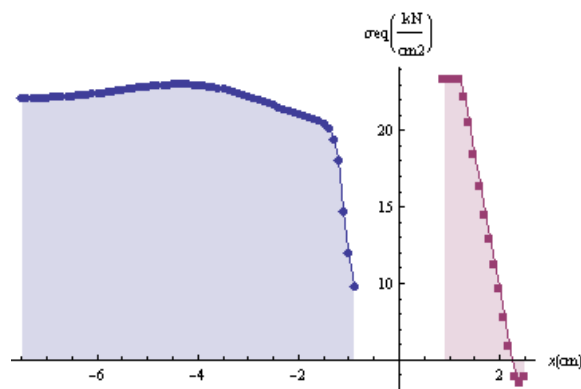
Slika 89: σ_{yy} po prerezu 3



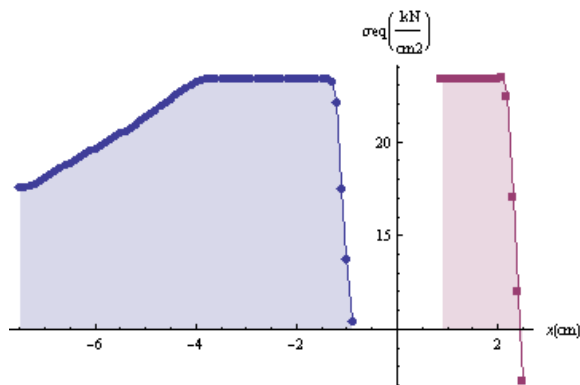
Slika 90: σ_{yy} po prerezu 4



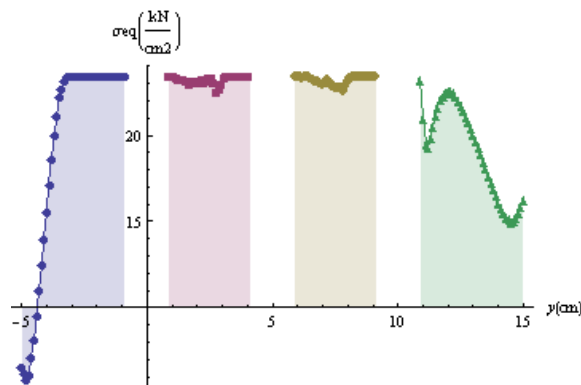
Slika 91: Misesova napetost po prerezu 1



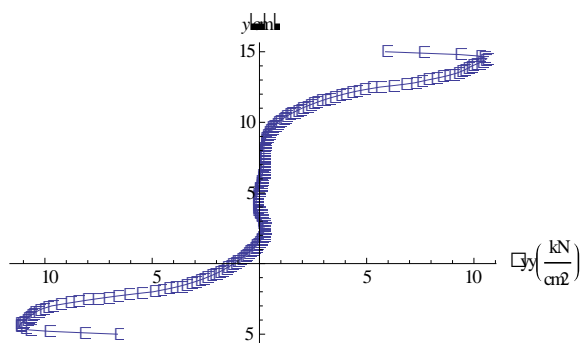
Slika 92: Misesova napetost po prerezu 2



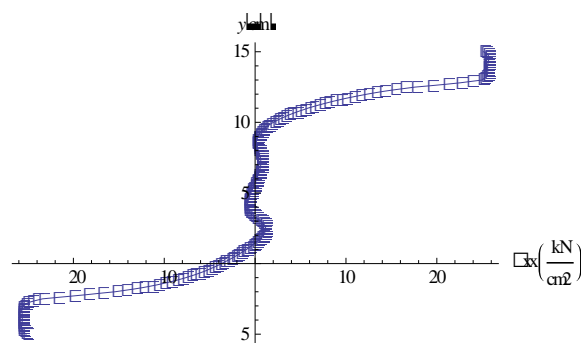
Slika 93: Misesova napetost po prerezu 3



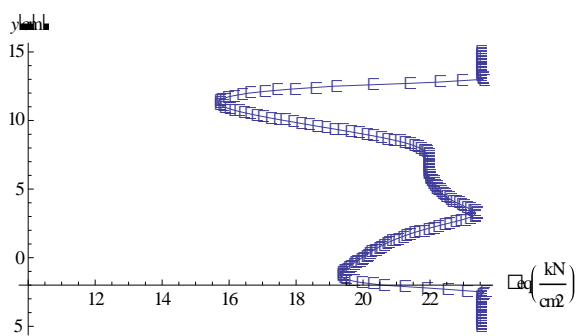
Slika 94: Misesova napetost po prerezu 4



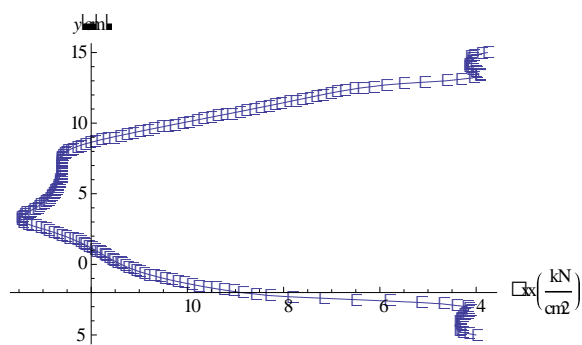
Slika 95: σ_{yy} po prerezu 5



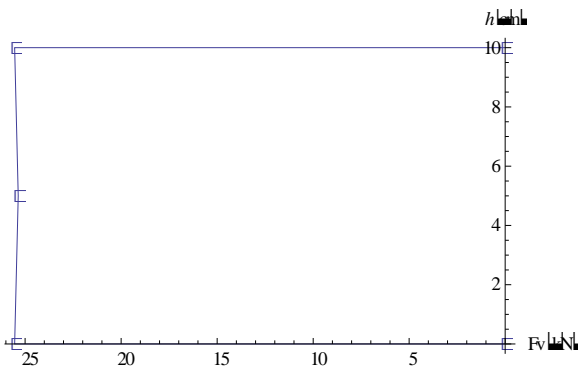
Slika 96: σ_{xx} po prerezu 5



Slika 97: Misesova napetost po prerezu 5



Slika 98: σ_{xy} po prerezu 5



Slika 99: Sile v vijakih V1, V2, V3

6.4.4 Mejne sile

Za primer 4 sem naredil še sedem variant analiz s programom AceFEM, pri katerih sem spreminjal različne parametre. Spreminjal sem gostoto mreže končnih elementov, ravninsko deformacijsko (RDS) ali ravninsko napetostno stanje (RNS) in funkcijo SmoothMesh, ki generira »boljšo« mrežo končnih elementov, ki se bolj prilega geometriji stika. Pri vseh analizah sem izpisal in primerjal mejno silo F_u (preglednica 4).

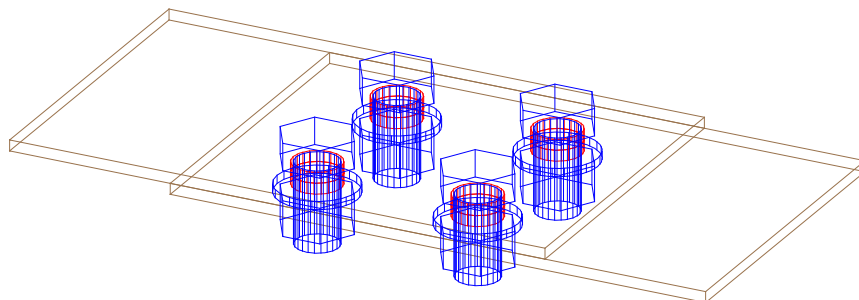
Preglednica 4: Mejne sile F_u

Varianta	Predpostavke v AceFEM-u	Mejna sila F_u [kN]
A	RDS, navadna mreža, SmoothMesh-izključen	82,04
B	RDS, gosta mreža, SmoothMesh-izključen	77,20
C	RNS, navadna mreža, SmoothMesh-izključen	79,21
D	RNS, gosta mreža, SmoothMesh-izključen	76,44
E	RDS, navadna mreža, SmoothMesh-vključen	75,93
F	RDS, gosta mreža, SmoothMesh-vključen	74,23
G	RNS, navadna mreža, SmoothMesh-vključen	74,53
H	RNS, gosta mreža, SmoothMesh-vključen	74,63
EN 1993-1-8	Merodajno: $V_{eff,1,k}$	80,02

Pri primeru 4 merodajno porušitev predstavlja strižni iztrg vijakov. Standard pri kontroli strižnega iztrga upošteva natezno trdnost f_u pri nategu in napetost tečenja f_y pri strigu. Razlike med rezultati numeričnih analiz in rezultati računa po EN 1993-1-8 so majhne. Pri vseh variantah numerične analize kjer sem predpostavil ravninsko napetostno stanje, sem dobil manjšo mejno silo F_u , kot pri variantah z ravninskim deformacijskim stanjem, razen pri variantah F in H. Pri vseh variantah numerične analize, kjer sem uporabil gostejšo mrežo končnih elementov sem dobil manjšo mejno silo F_u , razen pri variantah G in H. V vseh variantah analize z vključeno funkcijo SmoothMesh sem dobil manjšo mejno silo F_u , ne glede na gostoto mreže oziroma na ravninsko deformacijsko ali ravninsko napetostno stanje. Sile v vijakih so enakomerne.

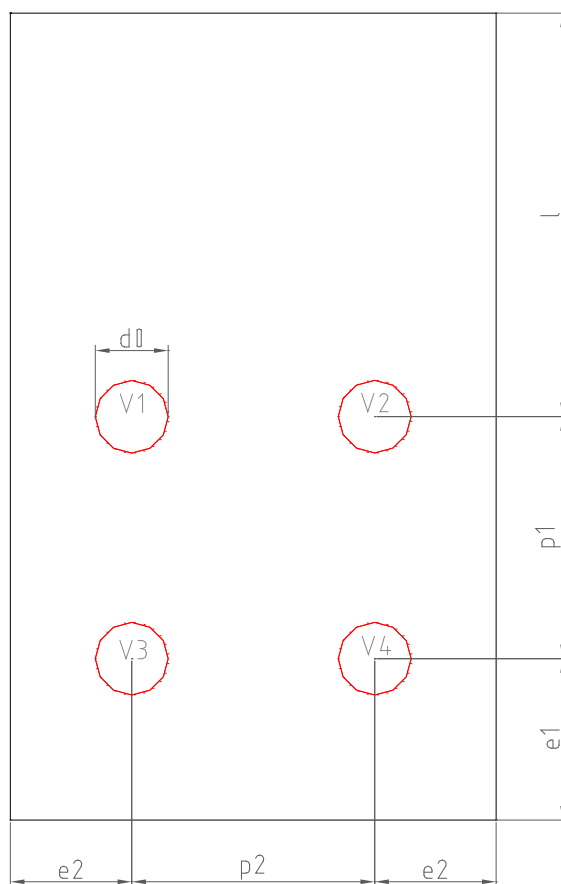
6.5 Primer 5-štirje vijaki (nateg)

Računal sem mejno nosilnost natezno obremenjenega vijčenega stika, sestavljenega iz dveh simetričnih pločevin in štirih vijakov (slika 100).



Slika 100: Skica primera 5

6.5.1 Geometrija pločevine



Slika 101: Geometrija pločevine primera 5

6.5.2 Račun nosilnosti po EN 1993-1-8

Jeklo: S235

Vijaki: M16 (8.8)

$$f_y = 23,5 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

$$f_{ub} = 80 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

$$th = 4 \text{ mm}$$

$$d = 16 \text{ mm}$$

$$d_0 = 18 \text{ mm}$$

$$e_1 = 40 \text{ mm}$$

$$e_2 = 30 \text{ mm}$$

$$p_1 = 60 \text{ mm}$$

$$p_2 = 60 \text{ mm}$$

$$l = 100 \text{ mm}$$

a) Strižna nosilnost vijakov

$$F_{v,k} = \alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A = 0,6 \cdot 80 \cdot 2,01 = 96,48 \text{ kN}$$

$$\sum F_{v,k} = n \cdot F_{v,k} = 4 \cdot 96,48 = 385,92 \text{ kN}$$

b) Kontrola bočnih pritiskov

-Robni vijaki

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{80}{36} = 2,22 \\ 1,0 \\ \frac{e_1}{3 \cdot d_0} = \frac{40}{3 \cdot 18} = 0,74 \end{array} \right\}$$

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \cdot \frac{30}{18} - 1,7 = 2,97 \\ 2,5 \end{array} \right\}$$

$$F_{b,k(\text{robni})} = k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t = 2,5 \cdot 0,74 \cdot 36 \cdot 1,6 \cdot 0,4 = 42,62 \text{ kN}$$

-Notranji vijaki

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{80}{36} = 2,22 \\ 1,0 \\ \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4} = \frac{60}{3 \cdot 18} - \frac{1}{4} = 0,86 \end{array} \right\}$$

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 \cdot \frac{60}{18} - 1,7 = 2,97 \\ 2,5 \end{array} \right\}$$

$$F_{b,k(\text{notranji})} = k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t = 2,5 \cdot 0,86 \cdot 36 \cdot 1,6 \cdot 0,4 = 49,53 \text{ kN}$$

-Celoten stik

$$\sum F_{b,k} = n_n \cdot F_{b,k(\text{notranji})} + n_r \cdot F_{b,k(\text{robni})} = 2 \cdot 49,53 + 2 \cdot 42,62 = 184,3 \text{ kN}$$

c)Kontrola bruto in neto prereza

$$N_{pl,k} = A \cdot f_y = 12 \cdot 0,4 \cdot 23,5 = 112,8 \text{ kN -bruto prerez}$$

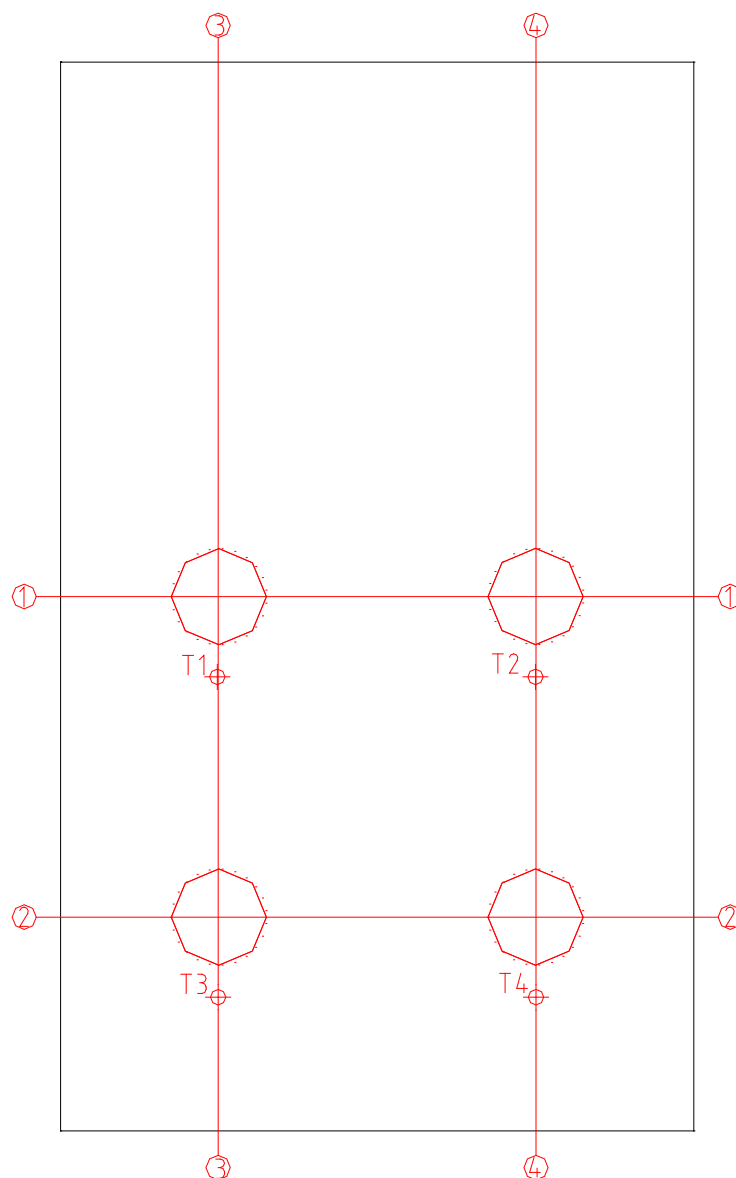
$$N_{u,k} = 0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u = 0,9 \cdot 8,4 \cdot 0,4 \cdot 36 = 108,86 \text{ kN -neto prerez}$$

d)Strižni iztrg

$$\begin{aligned} V_{eff,1,k} &= f_u \cdot A_{nv} + (1/\sqrt{3}) \cdot f_y \cdot A_{nt} = \\ &= 36 \cdot 4,2 \cdot 0,4 + (1/\sqrt{3}) \cdot 23,5 \cdot 14,6 \cdot 0,4 = 139,71 \text{ kN} \end{aligned}$$

6.5.3 Analiza s programom AceFEM

Med analizo sem poleg sile F izrisoval, v odvisnosti od pomika, tudi plastično deformacijo in Misesovo napetost v točkah na pločevini T1, T2, T3 in T4 (slika 102). Po končani analizi pa sem izrisal grafe napetosti σ_{yy} in Misesove napetosti po prečnih in vzdolžnih prerezih pločevine (slika 102). Na koncu sem izrisal tudi grafe sil v vijakih.

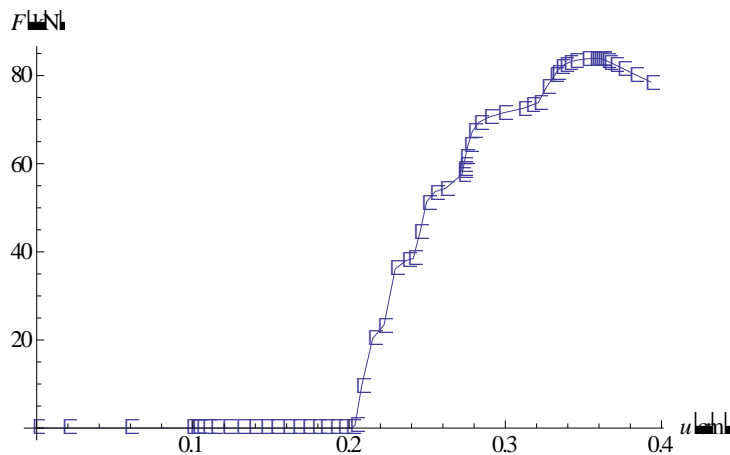


Slika 102: Točke in prerezi za primer 5

6.4.3.1 Varianta G

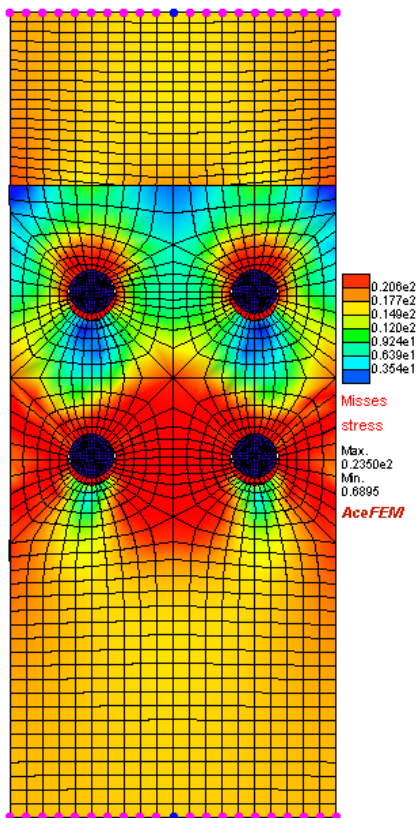
Predpostavke v AceFEM-u:

- ravninsko napetostno stanje
- navadna gostota mreže
- funkcija SmoothMesh je vključena

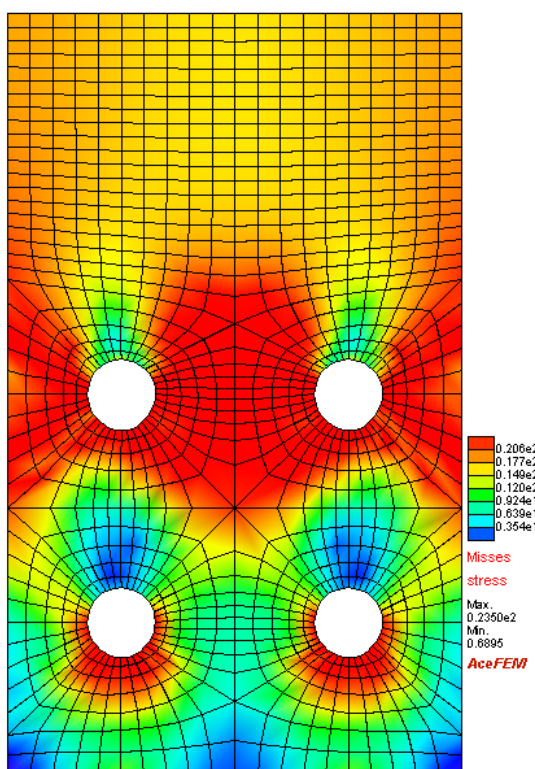


Slika 103: Sila-pomik

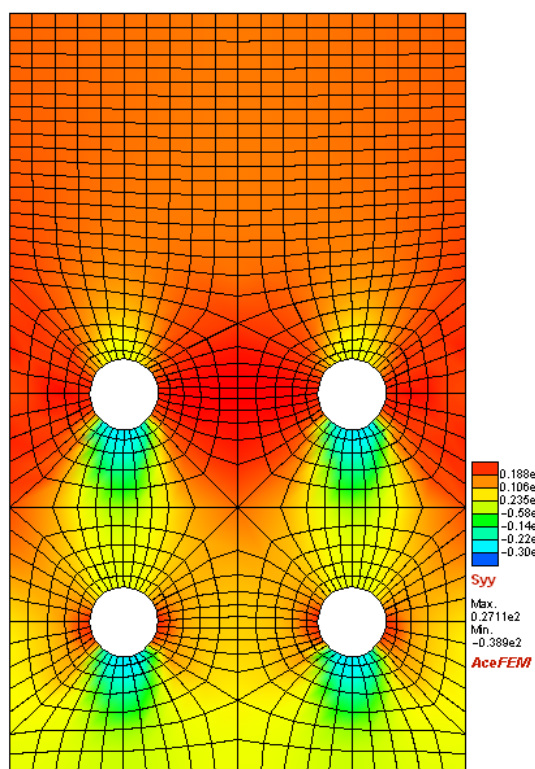
Mejna sila $F_u=83,92\text{kN}$



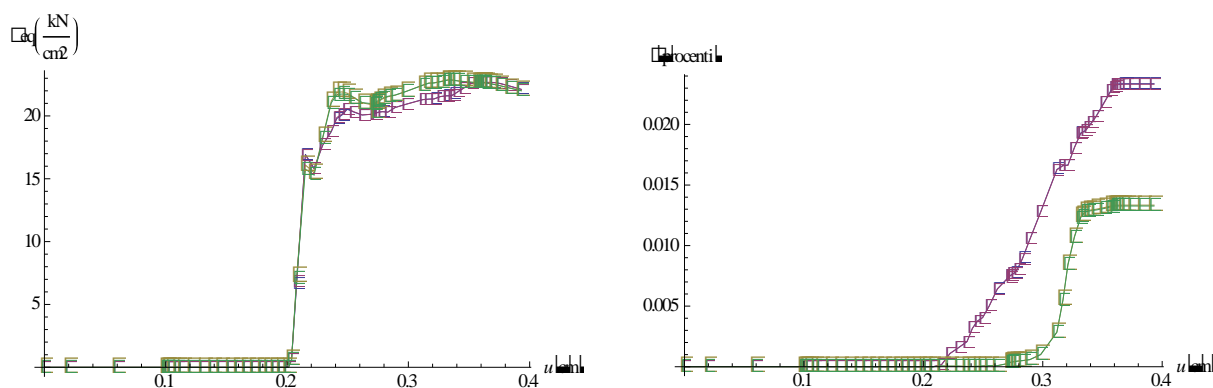
Slika 104: Misesova napetost po stiku



Slika 105: Misesova napetost po pločevini

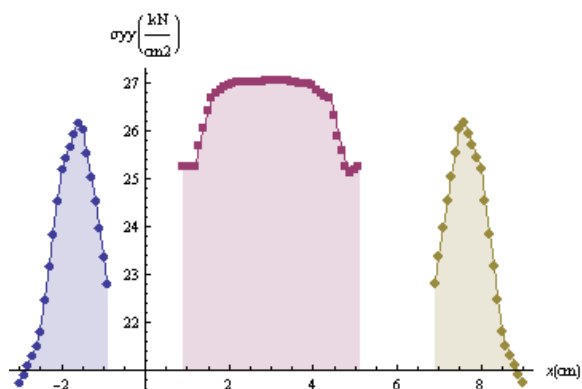


Slika 106: Napetost σ_{yy} po pločevini

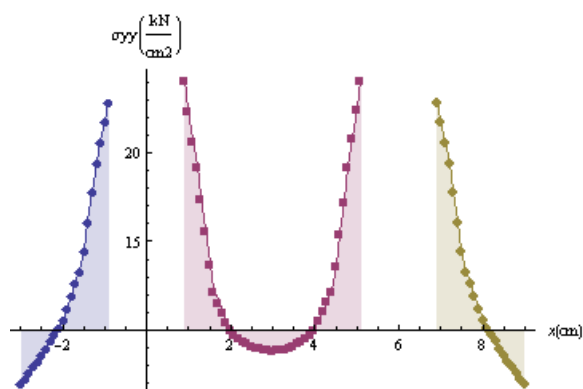


Slika 107: Misesova napetost in plastična deformacija v točkah T1, T2, T3 in T4

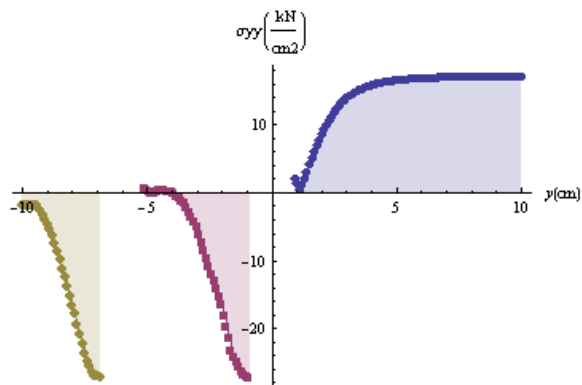
OPOMBA: T1-modra, T2-rdeča, T3-rumena, T4-zelena



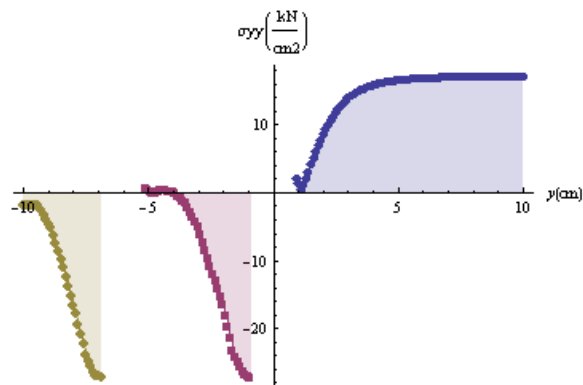
Slika 108: σ_{yy} po prerezu 1



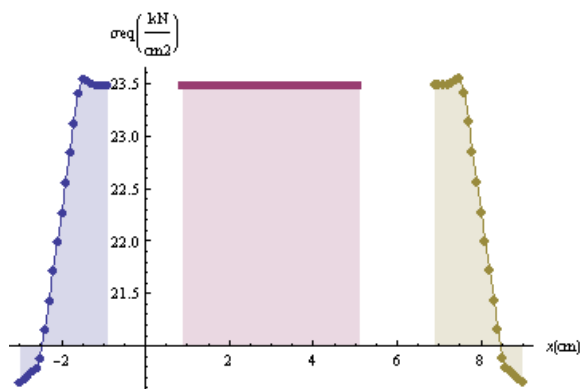
Slika 109: σ_{yy} po prerezu 2



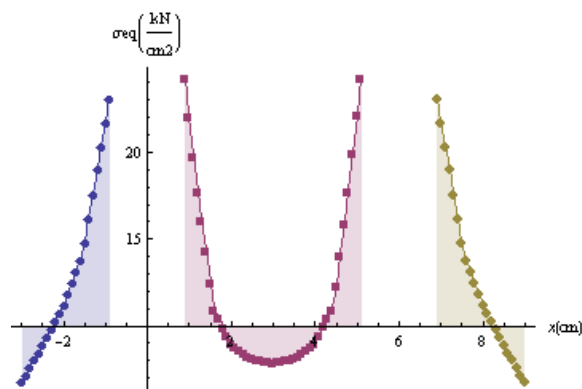
Slika 110: σ_{yy} po prerezu 3



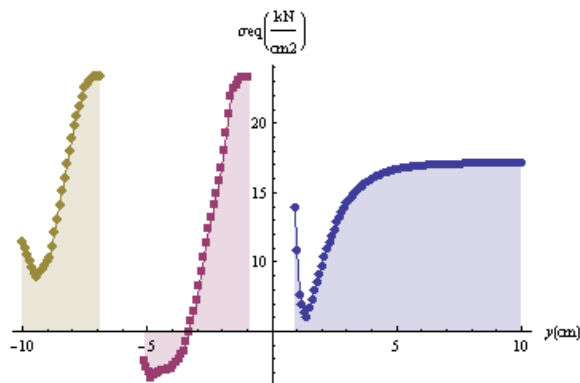
Slika 111: σ_{yy} po prerezu 4



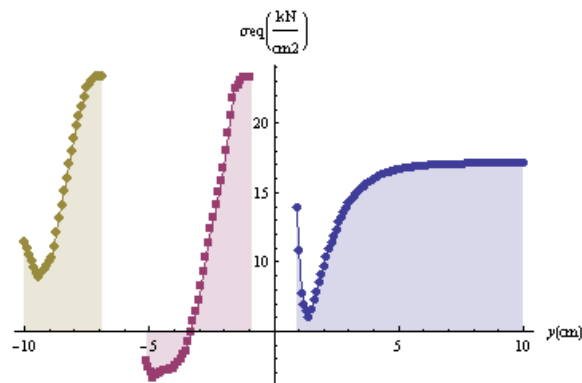
Slika 112: Misesova napetost po prerezu 1



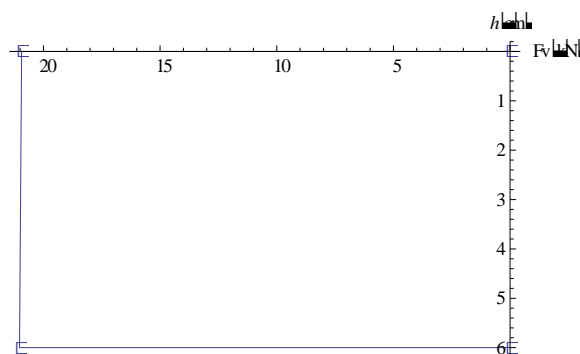
Slika 113: Misesova napetost po prerezu 2



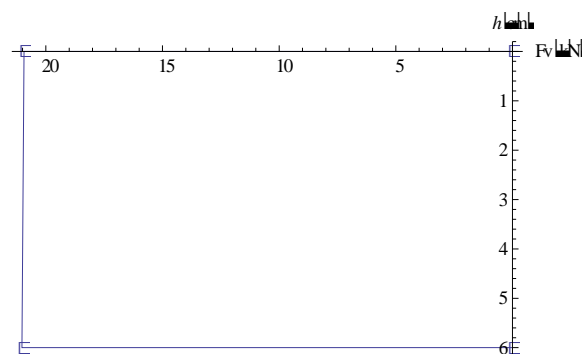
Slika 114: Misesova napetost po prerezu 3



Slika 115: Misesova napetost po prerezu 4



Slika 116: Sile v vijakih V1 in V3



Slika 117: Sile v vijakih V2 in V4

6.5.4 Mejne sile

Za primer 5 sem naredil še sedem variant analiz s programom AceFEM, pri katerih sem spreminjal različne parametre. Spreminjal sem gostoto mreže končnih elementov, ravninsko deformacijsko (RDS) ali ravninsko napetostno stanje (RNS) in funkcijo SmoothMesh, ki generira »boljšo« mrežo končnih elementov, ki se bolj prilega geometriji stika. Pri vseh analizah sem izpisal in primerjal mejno silo F_u (preglednica 5).

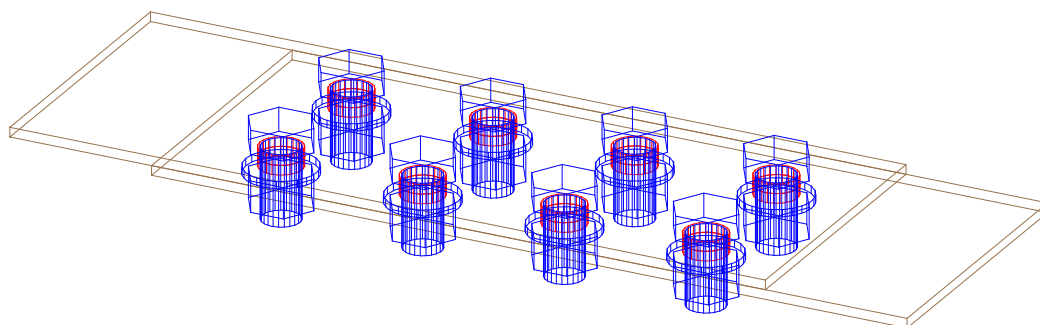
Preglednica 5: Mejne sile F_u

Varianta	Predpostavke v AceFEM-u	Mejna sila F_u [kN]
A	RDS, navadna mreža, SmoothMesh-izključen	107,09
B	RDS, gosta mreža, SmoothMesh-izključen	103,84
C	RNS, navadna mreža, SmoothMesh-izključen	83,67
D	RNS, gosta mreža, SmoothMesh-izključen	83,10
E	RDS, navadna mreža, SmoothMesh-vključen	104,63
F	RDS, gosta mreža, SmoothMesh-vključen	100,02
G	RNS, navadna mreža, SmoothMesh-vključen	83,92
H	RNS, gosta mreža, SmoothMesh-vključen	83,23
EN 1993-1-8	Merodajno: $N_{u,k}$	108,86

Pri primeru 5 merodajno porušitev predstavlja natezna porušitev po neto prerezu. Standard pri kontroli neto prereza upošteva utrjevanje materiala, saj formula vsebuje natezno trdnost f_u . Prav tako standard upošteva ugodne vplive prostorskega napetostnega stanja v okolici vijaka. Zaradi tega pride do razlike med rezultati numeričnih analiz in rezultati računa po EN 1993-1-8. Pri vseh variantah numerične analize kjer sem predpostavil ravninsko napetostno stanje, sem dobil precej manjšo mejno silo F_u , kot pri variantah z ravninskim deformacijskim stanjem. Do tega pride, ker ravninsko deformacijsko stanje določa da je deformacija $\varepsilon_{zz} = 0$ in s tem predpostavi konstanten prečni prerez pločevine, med deformiranjem v smeri delovanja obtežbe. Pri ravninskem deformacijskem stanju pride do nastanka prostorskega napetostnega stanja, ki poveča nosilnost materiala. Pri vseh variantah numerične analize, kjer sem uporabil gostejšo mrežo končnih elementov sem dobil manjšo mejno silo F_u , vendar pa se je s tem bistveno podaljšal čas analize. V primeru ravninskega deformacijskega stanja je funkcija SmoothMesh zmanjšala mejno silo F_u , v primeru ravninskega napetostnega stanja pa jo je povečala.

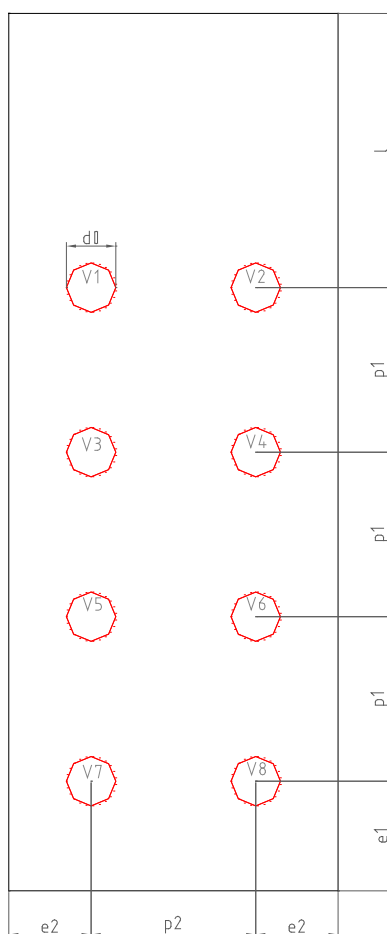
6.6 Primer 6-osem vijakov (nateg)

Računal sem mejno nosilnost natežno obremenjenega vijčenega stika, sestavljenega iz dveh simetričnih pločevin in osmih vijakov (slika 118).



Slika 118: Skica primera 6

6.5.1 Geometrija pločevine



Slika 119: Geometrija pločevine primera 6

6.6.2 Račun nosilnosti po EN 1993-1-8

Jeklo: S235

Vijaki: M16 (8.8)

$$f_y = 23,5 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

$$f_{ub} = 80 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

$$th = 4 \text{ mm}$$

$$d = 16 \text{ mm}$$

$$d_0 = 18 \text{ mm}$$

$$e_1 = 40 \text{ mm}$$

$$e_2 = 30 \text{ mm}$$

$$p_1 = 60 \text{ mm}$$

$$p_2 = 60 \text{ mm}$$

$$l = 100 \text{ mm}$$

a) Strižna nosilnost vijakov

$$F_{V,k} = \alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A = 0,6 \cdot 80 \cdot 2,01 = 96,48 \text{ kN}$$

$$\sum F_{V,k} = n \cdot F_{V,k} = 8 \cdot 96,48 = 771,84 \text{ kN}$$

b) Kontrola bočnih pritiskov

-Robni vijaki

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{80}{36} = 2,22 \\ 1,0 \\ \frac{e_1}{3 \cdot d_0} = \frac{40}{3 \cdot 18} = 0,74 \end{array} \right\}$$

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \cdot \frac{30}{18} - 1,7 = 2,97 \\ 2,5 \end{array} \right\}$$

$$F_{b,k(\text{robni})} = k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t = 2,5 \cdot 0,74 \cdot 36 \cdot 1,6 \cdot 0,4 = 42,62 \text{ kN}$$

-Notranji vijaki

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{80}{36} = 2,22 \\ 1,0 \\ \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4} = \frac{60}{3 \cdot 18} - \frac{1}{4} = 0,86 \end{array} \right\}$$

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 \cdot \frac{60}{18} - 1,7 = 2,97 \\ 2,5 \end{array} \right\}$$

$$F_{b,k(\text{notranji})} = k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t = 2,5 \cdot 0,86 \cdot 36 \cdot 1,6 \cdot 0,4 = 49,53 \text{ kN}$$

-Celoten stik

$$\sum F_{b,k} = n_n \cdot F_{b,k(\text{notranji})} + n_r \cdot F_{b,k(\text{robni})} = 6 \cdot 49,53 + 2 \cdot 42,62 = 382,42 \text{ kN}$$

c) Kontrola bruto in neto prereza

$$N_{pl,k} = A \cdot f_y = 12 \cdot 0,4 \cdot 23,5 = 112,8 \text{ kN} \text{ -bruto prerez}$$

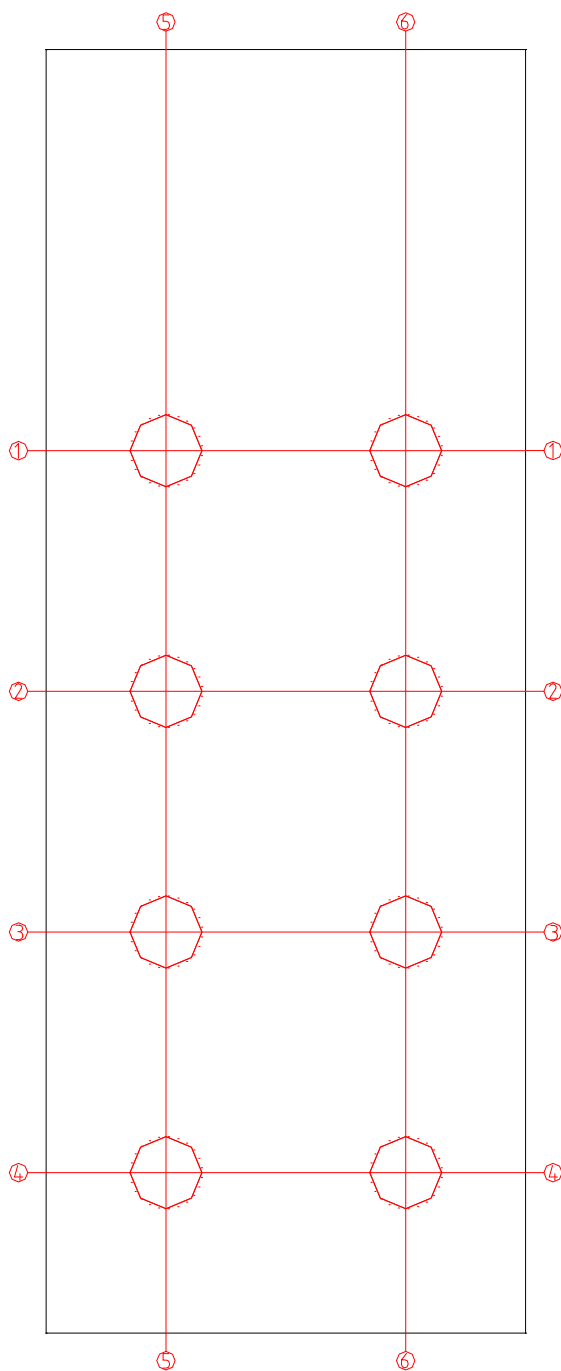
$$N_{u,k} = 0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u = 0,9 \cdot 8,4 \cdot 0,4 \cdot 36 = 108,86 \text{ kN} \text{ -neto prerez}$$

d) Strižni iztrg

$$\begin{aligned} V_{eff,1,k} &= f_u \cdot A_{nt} + (1/\sqrt{3}) \cdot f_y \cdot A_{nv} = \\ &= 36 \cdot 4,2 \cdot 0,4 + (1/\sqrt{3}) \cdot 23,5 \cdot 31,4 \cdot 0,4 = 230,89 \text{ kN} \end{aligned}$$

6.6.3 Analiza s programom AceFEM

Med analizo sem izrisoval silo F , v odvisnosti od pomika. Po končani analizi pa sem izrisal grafe napetosti σ_{yy} in Misesove napetosti po prečnih in vzdolžnih prerezih pločevine (slika 120). Na koncu sem izrisal tudi grafe sil v vijakih.

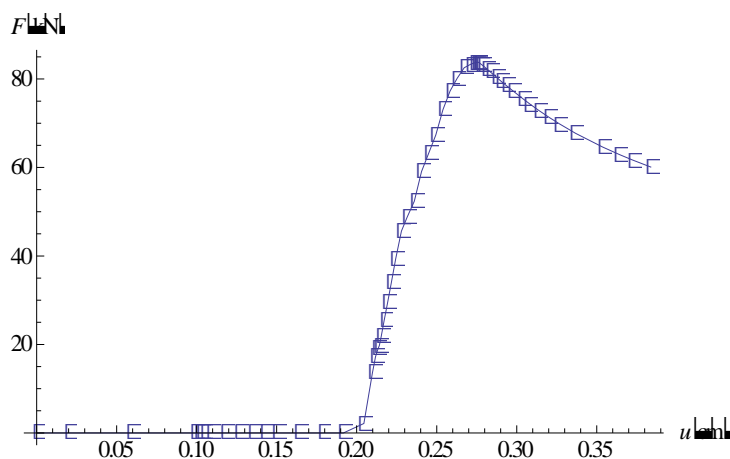


Slika 120: Prerezi za primer 6

6.6.3.1 Varianta H

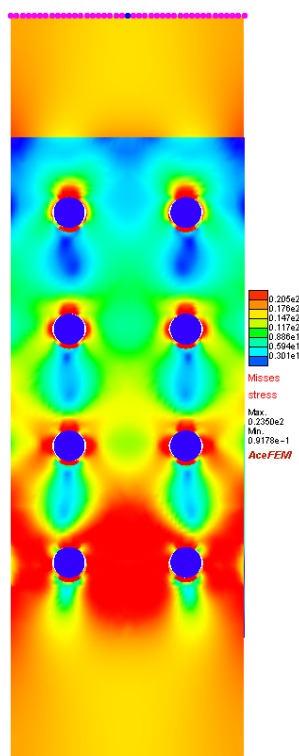
Predpostavke v AceFEM-u:

- ravninsko napetostno stanje
- večja gostota mreže
- funkcija SmoothMesh je vključena

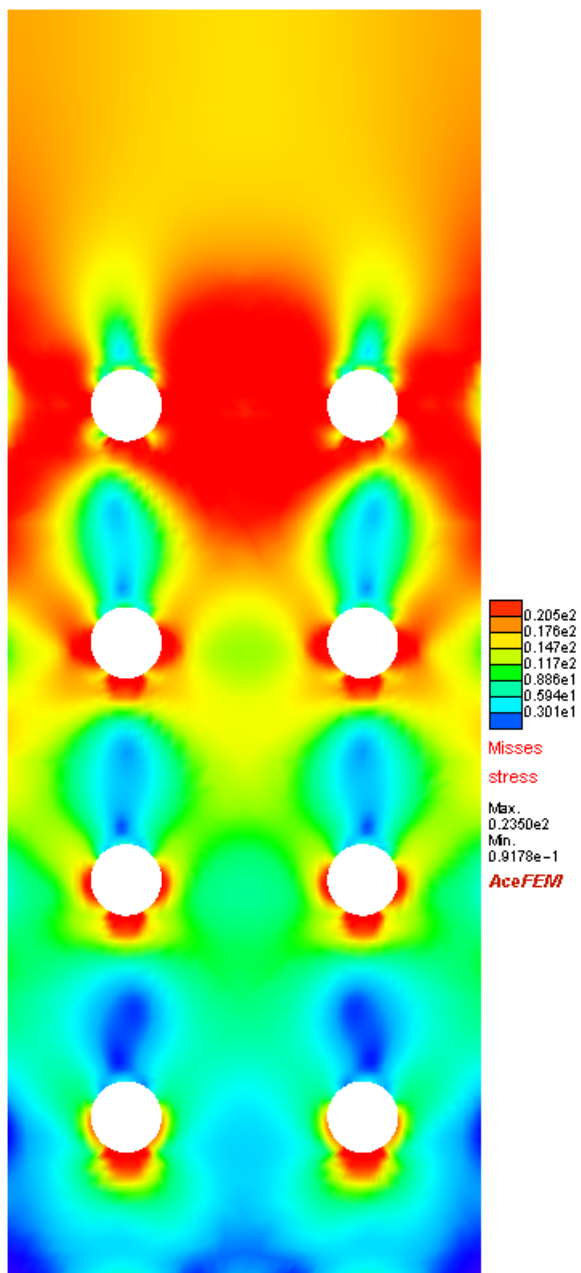


Slika 121: Sila-pomik

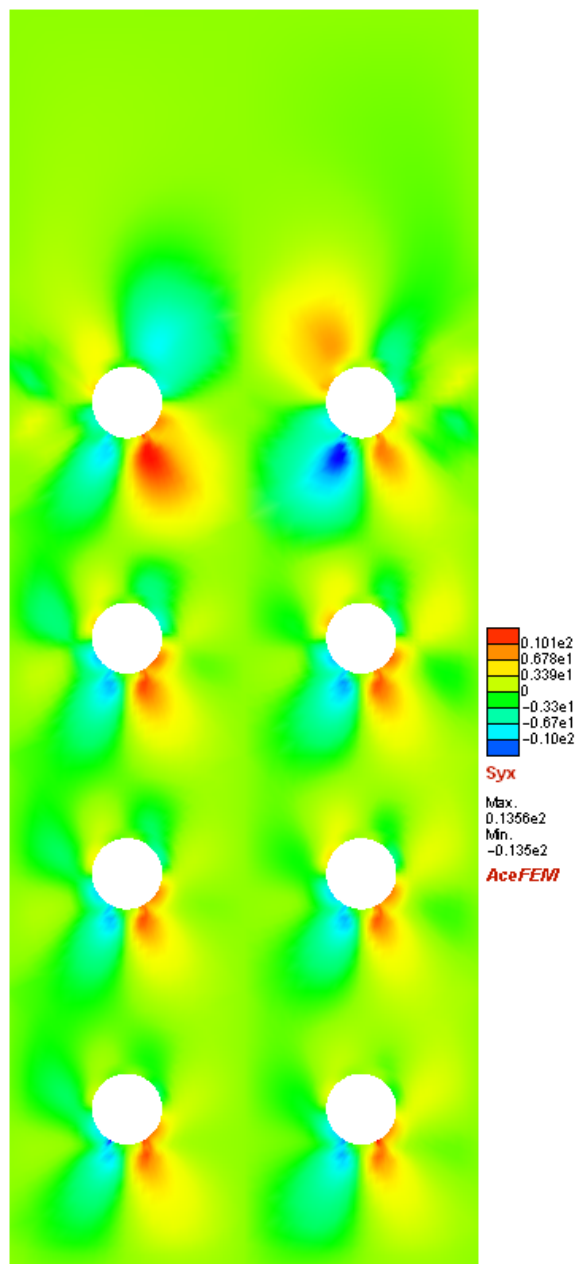
Mejna sila $F_u=83,78\text{kN}$



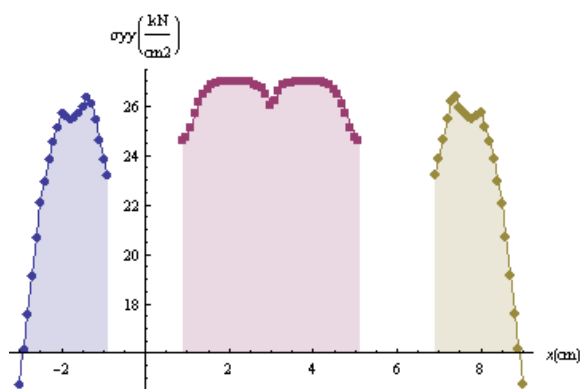
Slika 122: Misesova napetost po stiku



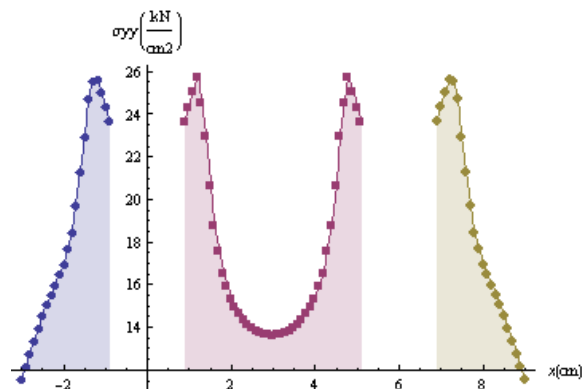
Slika 123: Misesova napetost po pločevini



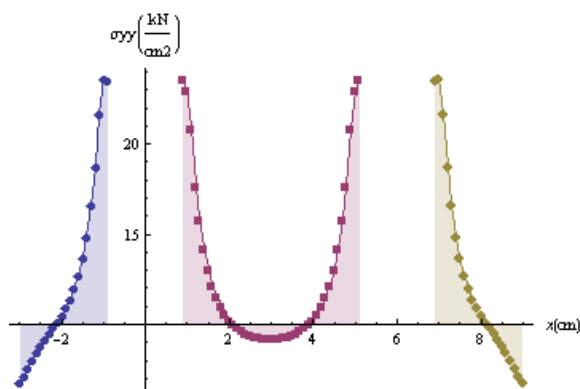
Slika 124: Napetost σ_{yy} po pločevini



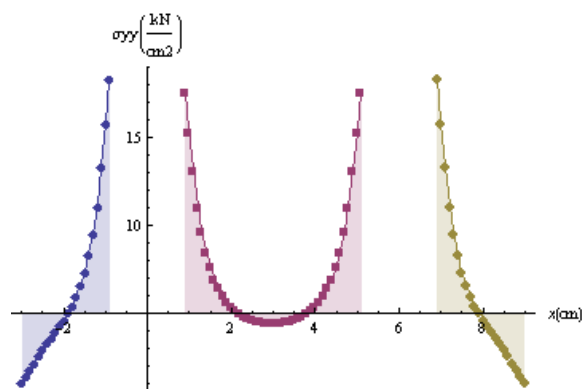
Slika 125: σ_{yy} po prerezu 1



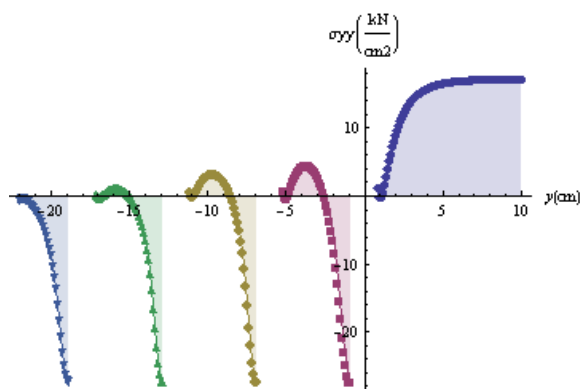
Slika 126: σ_{yy} po prerezu 2



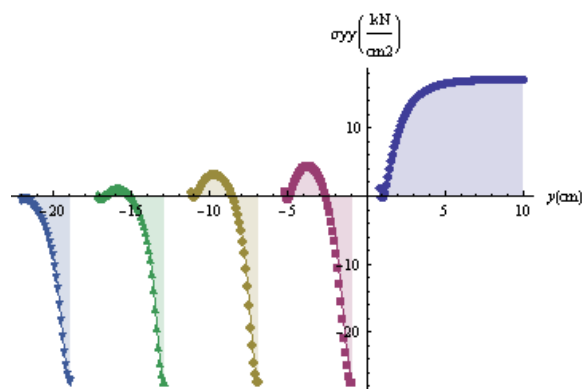
Slika 127: σ_{yy} po prerezu 3



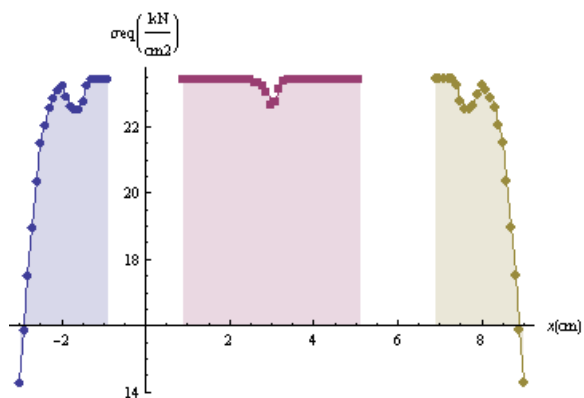
Slika 128: σ_{yy} po prerezu 4



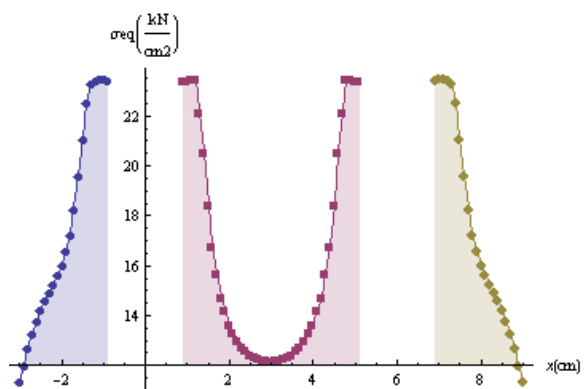
Slika 129: σ_{yy} po prerezu 5



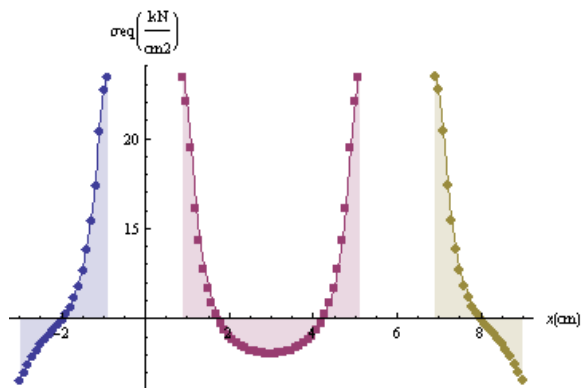
Slika 130: σ_{yy} po prerezu 6



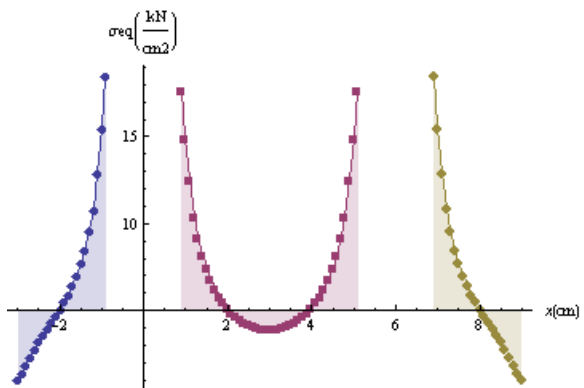
Slika 131: Misesova napetost po prerezu 1



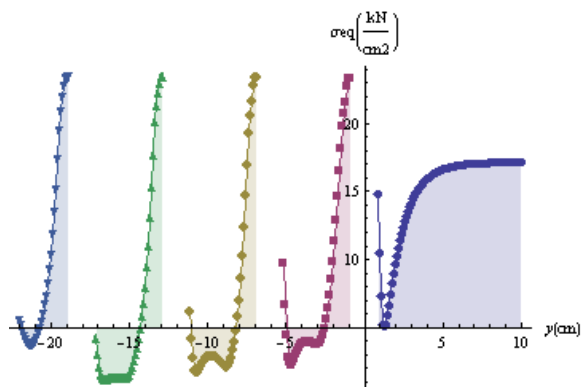
Slika 132: Misesova napetost po prerezu 2



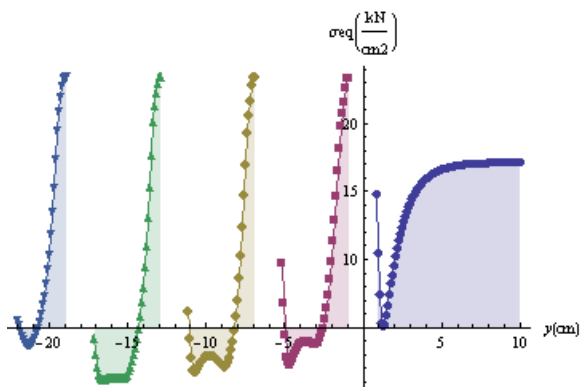
Slika 133: Misesova napetost po prerezu 3



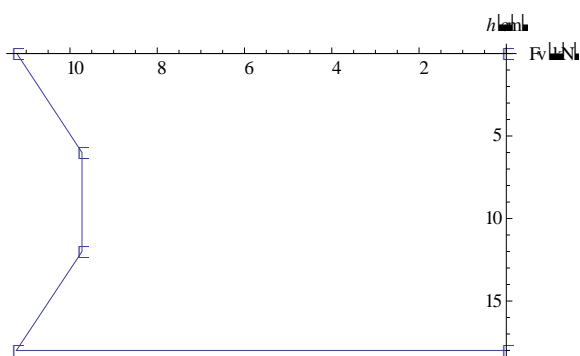
Slika 134: Misesova napetost po prerezu 4



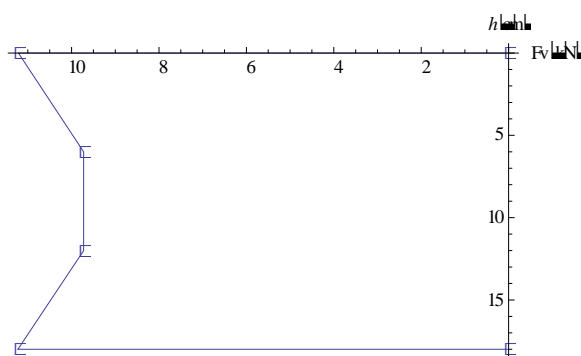
Slika 135: Misesova napetost po prerezu 5



Slika 136: Misesova napetost po prerezu 6



Slika 137: Sile v vijakih V1, V3, V5 in V7



Slika 138: Sile v vijakih V2, V4, V6 in V8

6.6.4 Mejne sile

Za primer 6 sem naredil še sedem variant analiz s programom AceFEM, pri katerih sem spreminjal različne parametre. Spreminjal sem gostoto mreže končnih elementov, ravninsko deformacijsko (RDS) ali ravninsko napetostno stanje (RNS) in funkcijo SmoothMesh, ki generira »boljšo« mrežo končnih elementov, ki se bolj prilega geometriji stika. Pri vseh analizah sem izpisal in primerjal mejno silo F_u (preglednica 6).

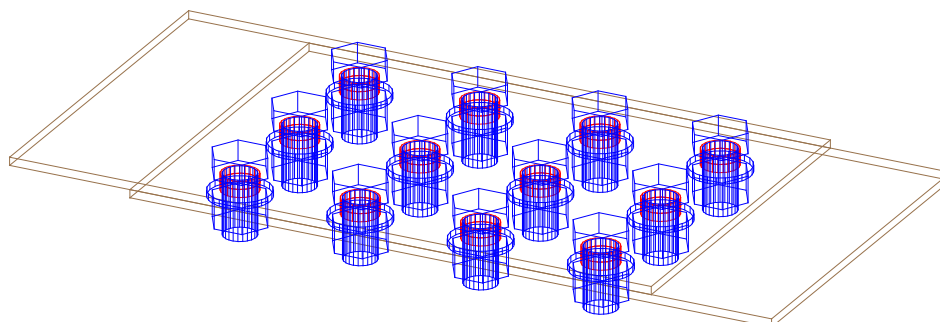
Preglednica 6: Mejne sile F_u

Varianta	Predpostavke v AceFEM-u	Mejna sila F_u [kN]
A	RDS, navadna mreža, SmoothMesh-izključen	107.68
B	RDS, gosta mreža, SmoothMesh-izključen	107.16
C	RNS, navadna mreža, SmoothMesh-izključen	84.23
D	RNS, gosta mreža, SmoothMesh-izključen	83.85
E	RDS, navadna mreža, SmoothMesh-vključen	107.65
F	RDS, gosta mreža, SmoothMesh-vključen	107.16
G	RNS, navadna mreža, SmoothMesh-vključen	83.93
H	RNS, gosta mreža, SmoothMesh-vključen	83.78
EN 1993-1-8	Merodajno: $N_{u,k}$	108,86

Pri primeru 6 merodajno porušitev predstavlja natezna porušitev po neto prerezu. Standard pri kontroli neto prereza upošteva utrjevanje materiala, saj formula vsebuje natezno trdnost f_u . Prav tako standard upošteva ugodne vplive prostorskega napetostnega stanja v okolici vijaka. Zaradi tega pride do razlike med rezultati numeričnih analiz in rezultati računa po EN 1993-1-8. Pri vseh variantah numerične analize kjer sem predpostavil ravninsko napetostno stanje, sem dobil precej manjšo mejno silo F_u , kot pri variantah z ravninskim deformacijskim stanjem. Do tega pride, ker ravninsko deformacijsko stanje določa da je deformacija $\varepsilon_{zz} = 0$ in s tem predpostavi konstanten prečni prerez pločevine, med deformiranjem v smeri delovanja obtežbe. Pri ravninskem deformacijskem stanju pride do nastanka prostorskega napetostnega stanja, ki poveča nosilnost materiala. Pri vseh variantah numerične analize, kjer sem uporabil gostejšo mrežo končnih elementov sem dobil manjšo mejno silo F_u , vendar pa se je s tem bistveno podaljšal čas analize. V vseh variantah numerične analize je funkcija SmoothMesh zmanjšala mejno silo F_u . Pri silah v vijakih že pride do zmanjšanja sil pri srednjih vijakih, vendar gre še vedno za kratek stik.

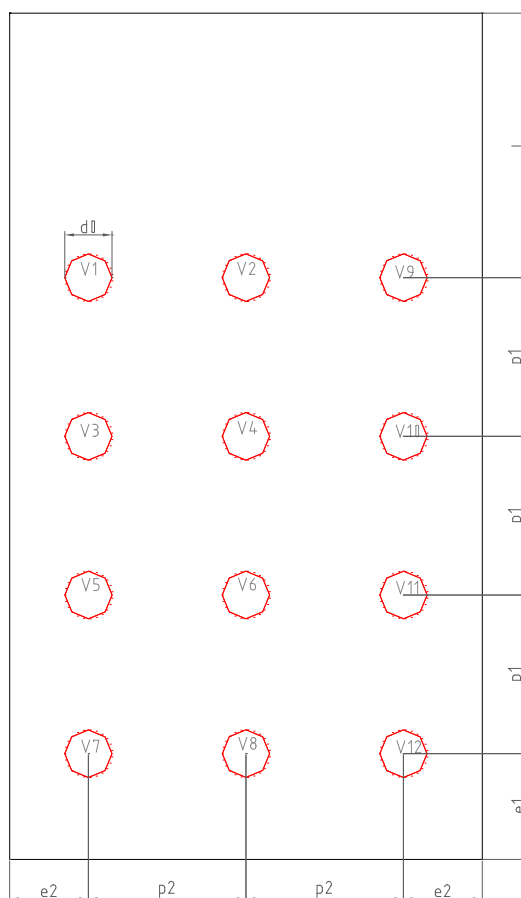
6.7 Primer 7-dvanajst vijakov (nateg)

Računal sem mejno nosilnost natezno obremenjenega vijčenega stika, sestavljenega iz dveh simetričnih pločevin in dvanajstih vijakov (slika 139).



Slika 139: Skica primera 7

6.7.1 Geometrija pločvine



Slika 140: Geometrija pločvine primera 7

6.7.2 Račun nosilnosti po EN 1993-1-8

Jeklo: S235

Vijaki: M16 (8.8)

$$f_y = 23,5 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

$$f_{ub} = 80 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

$$th = 4 \text{ mm}$$

$$d = 16 \text{ mm}$$

$$d_0 = 18 \text{ mm}$$

$$e_1 = 40 \text{ mm}$$

$$e_2 = 30 \text{ mm}$$

$$p_1 = 60 \text{ mm}$$

$$p_2 = 60 \text{ mm}$$

$$l = 100 \text{ mm}$$

a) Strižna nosilnost vijakov

$$F_{V,k} = \alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A = 0,6 \cdot 80 \cdot 2,01 = 96,48 \text{ kN}$$

$$\sum F_{V,k} = n \cdot F_{V,k} = 12 \cdot 96,48 = 1157,76 \text{ kN}$$

b) Kontrola bočnih pritiskov

-Robni vijaki

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{80}{36} = 2,22 \\ 1,0 \\ \frac{e_1}{3 \cdot d_0} = \frac{40}{3 \cdot 18} = 0,74 \end{array} \right\}$$

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \cdot \frac{30}{18} - 1,7 = 2,97 \\ 2,5 \end{array} \right\}$$

$$F_{b,k(\text{robni})} = k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t = 2,5 \cdot 0,74 \cdot 36 \cdot 1,6 \cdot 0,4 = 42,62 \text{ kN}$$

-Notranji vijaki

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{80}{36} = 2,22 \\ 1,0 \\ \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4} = \frac{60}{3 \cdot 18} - \frac{1}{4} = 0,86 \end{array} \right\}$$

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 \cdot \frac{60}{18} - 1,7 = 2,97 \\ 2,5 \end{array} \right\}$$

$$F_{b,k(\text{notranji})} = k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t = 2,5 \cdot 0,86 \cdot 36 \cdot 1,6 \cdot 0,4 = 49,53 \text{ kN}$$

-Celoten stik

$$\sum F_{b,k} = n_n \cdot F_{b,k(\text{notranji})} + n_r \cdot F_{b,k(\text{robni})} = 10 \cdot 49,53 + 2 \cdot 42,62 = 580,54 \text{ kN}$$

c) Kontrola bruto in neto prereza

$$N_{pl,k} = A \cdot f_y = 18 \cdot 0,4 \cdot 23,5 = 169,2 \text{ kN -bruto prerez}$$

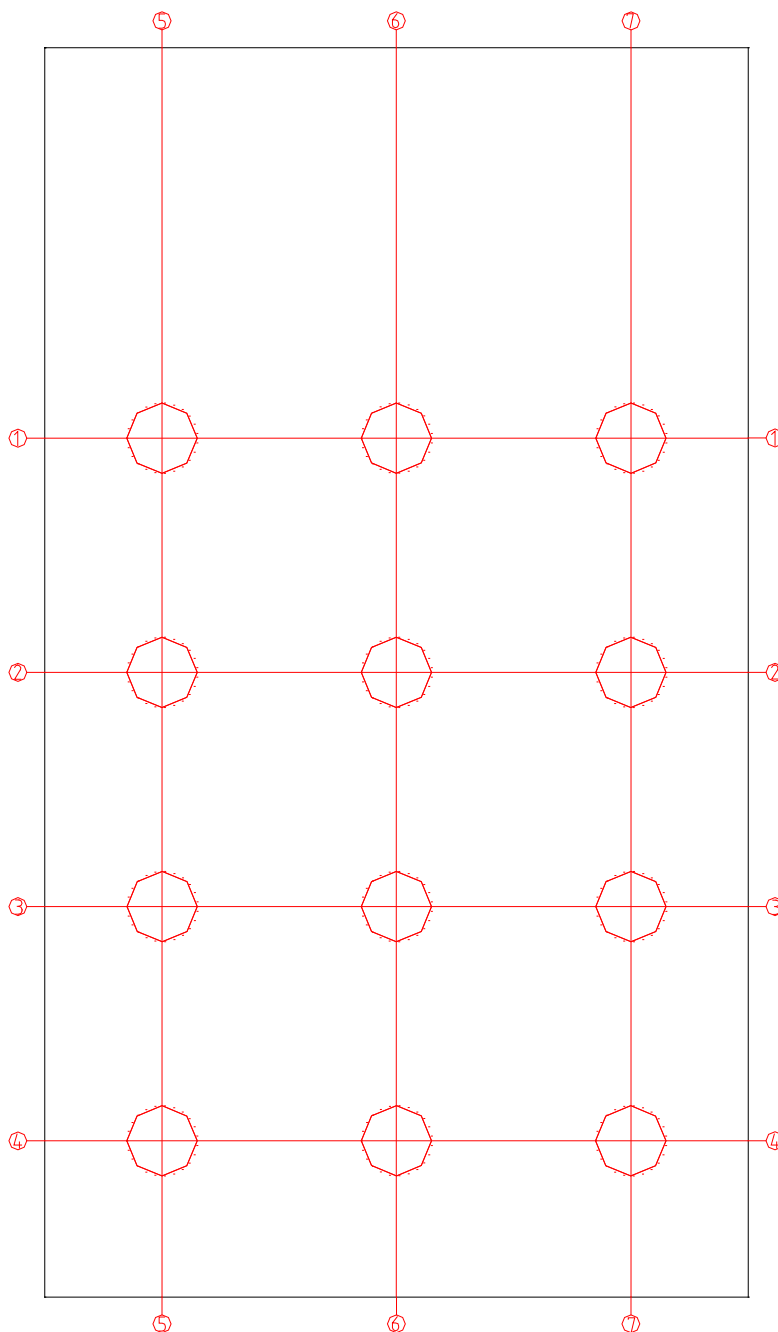
$$N_{u,k} = 0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u = 0,9 \cdot 12,6 \cdot 0,4 \cdot 36 = 163,29 \text{ kN -neto prerez}$$

d) Strižni iztrg

$$\begin{aligned} V_{eff,1,k} &= f_u \cdot A_{nt} + (1/\sqrt{3}) \cdot f_y \cdot A_{nv} = \\ &= 36 \cdot 8,4 \cdot 0,4 + (1/\sqrt{3}) \cdot 23,5 \cdot 31,4 \cdot 0,4 = 291,37 \text{ kN} \end{aligned}$$

6.7.3 Analiza s programom AceFEM

Med analizo sem izrisoval silo F , v odvisnosti od pomika. Po končani analizi pa sem izrisal grafe napetosti σ_{yy} in Misesove napetosti po prečnih in vzdolžnih prerezih pločevine (slika 141). Na koncu sem izrisal tudi grafe sil v vijakih.

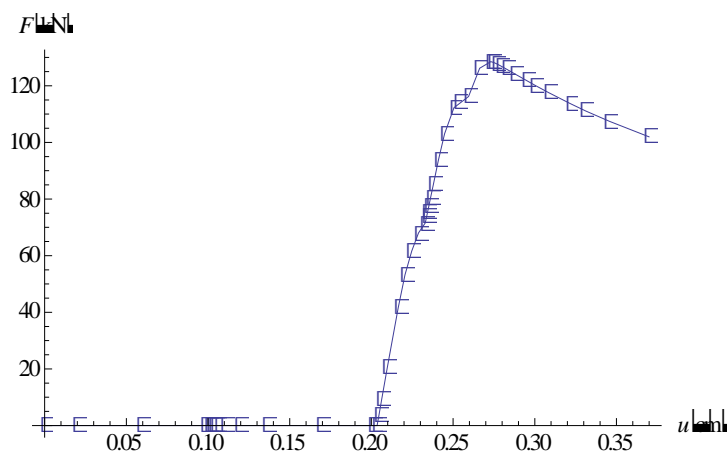


Slika 141: Prerezi za primer 7

6.7.3.1 Varianta G

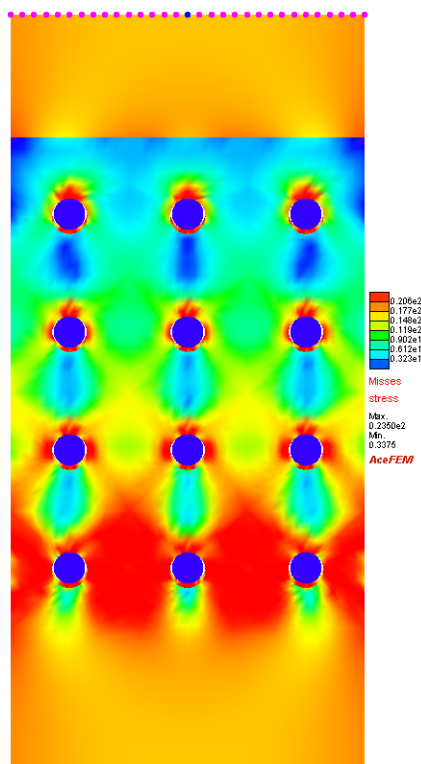
Predpostavke v AceFEM-u:

- ravninsko napetostno stanje
- navadna gostota mreže
- funkcija SmoothMesh je vključena

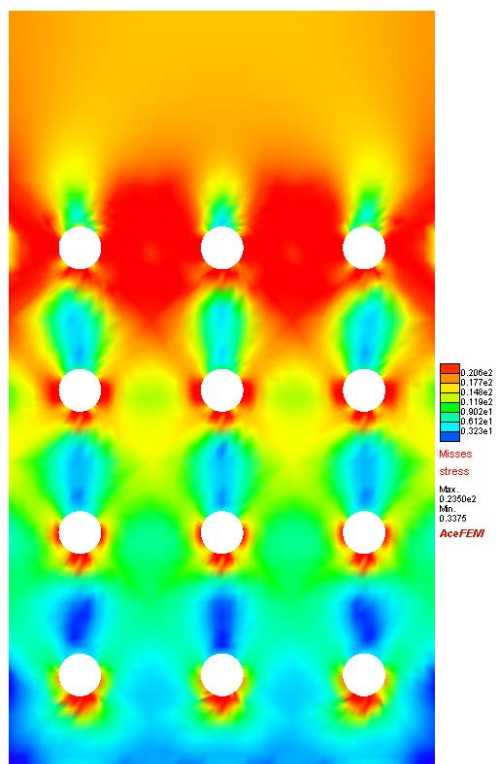


Slika 142: Sila-pomik

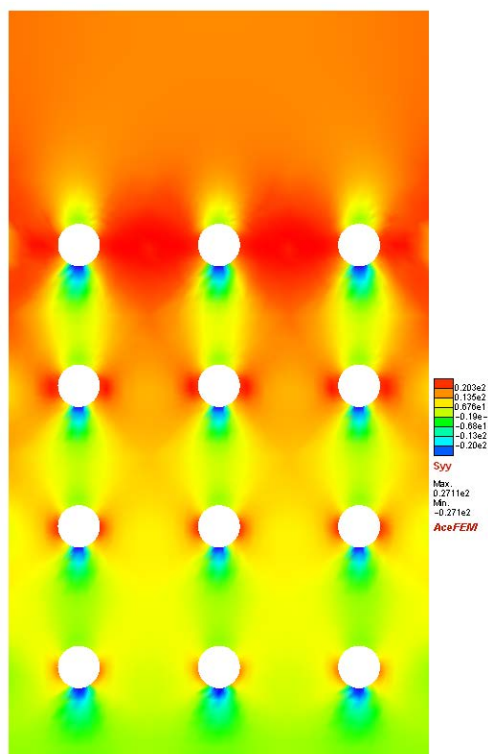
Mejna sila $F_u=128,25\text{kN}$



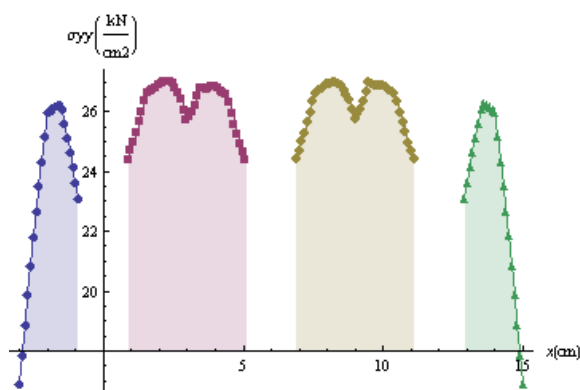
Slika 143: Misesova napetost po stiku



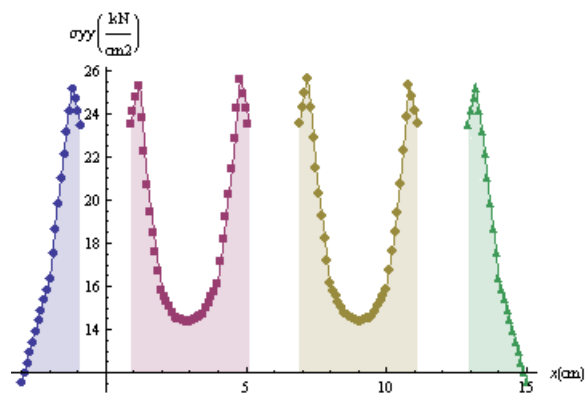
Slika 144: Misesova napetost po pločevini



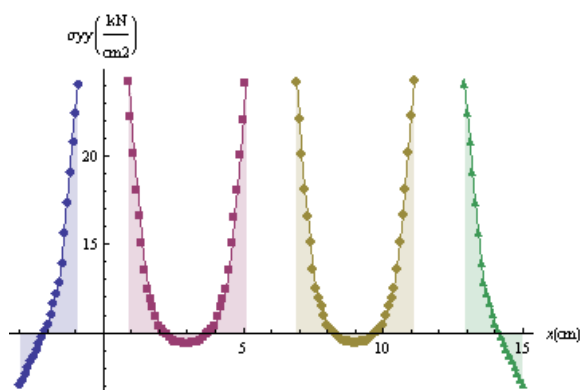
Slika 145: Napetost σ_{yy} po pločevini



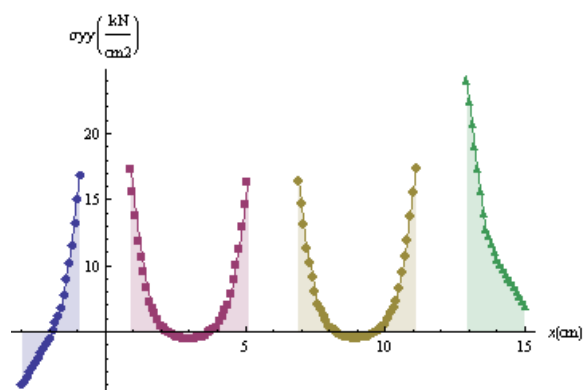
Slika 146: σ_{yy} po prerezu 1



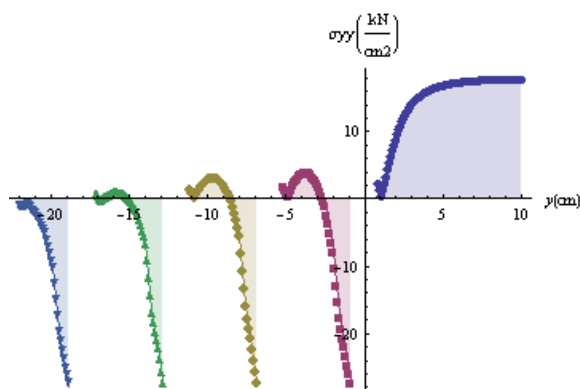
Slika 147: σ_{yy} po prerezu 2



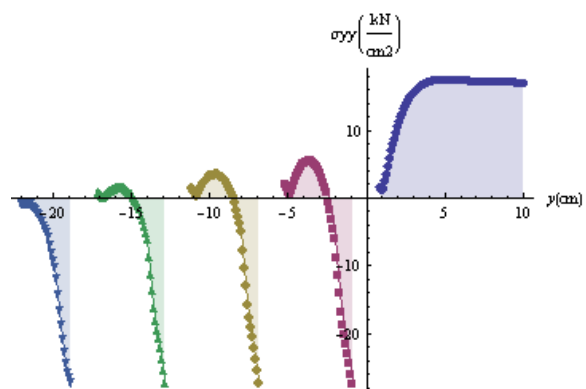
Slika 148: σ_{yy} po prerezu 3



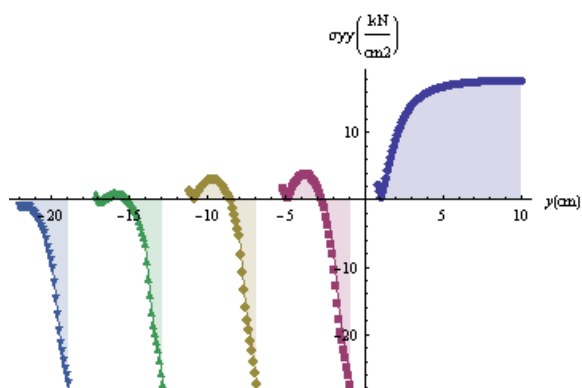
Slika 149: σ_{yy} po prerezu 4



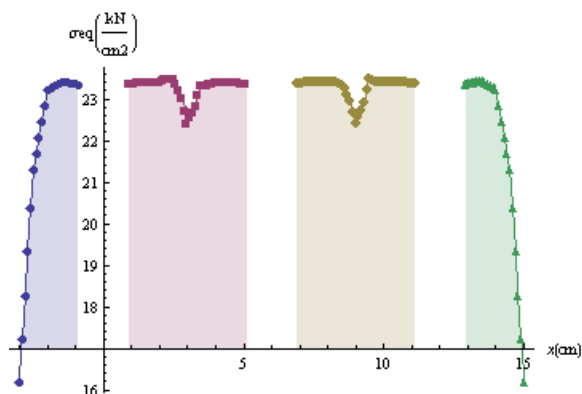
Slika 150: σ_{yy} po prerezu 5



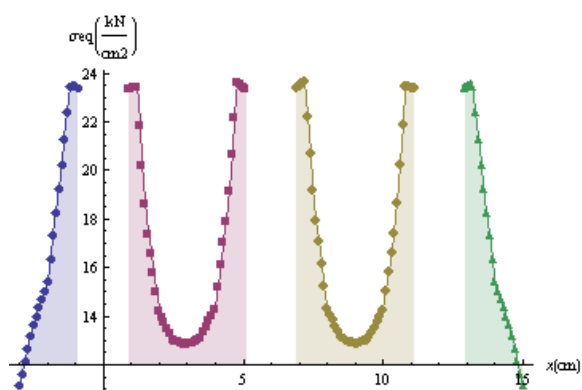
Slika 151: σ_{yy} po prerezu 6



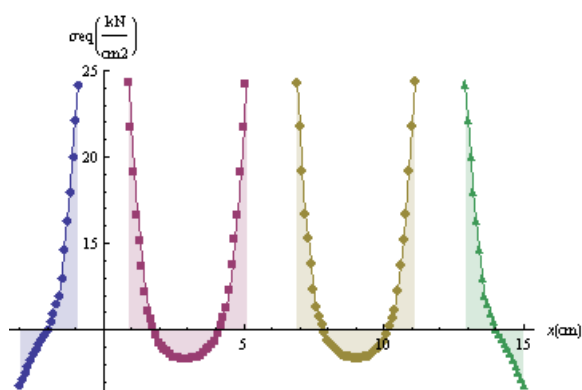
Slika 152: σ_{yy} po prerezu 7



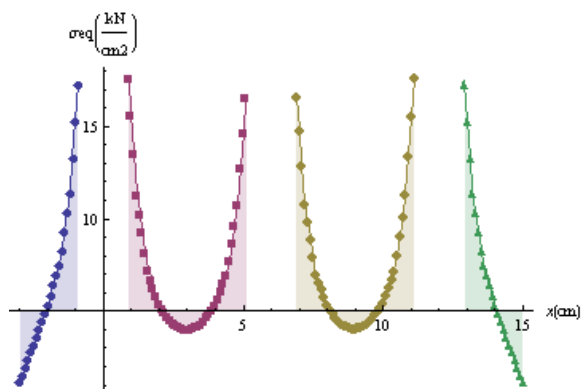
Slika 153: Misesova napetost po prerezu 1



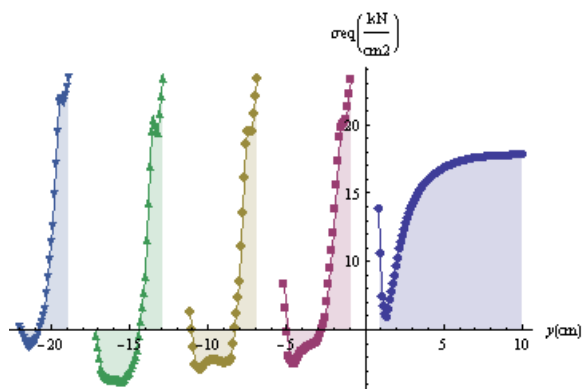
Slika 154: Misesova napetost po prerezu 2



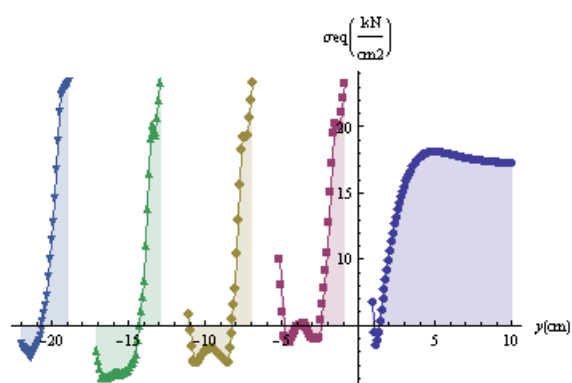
Slika 155: Misesova napetost po prerezu 3



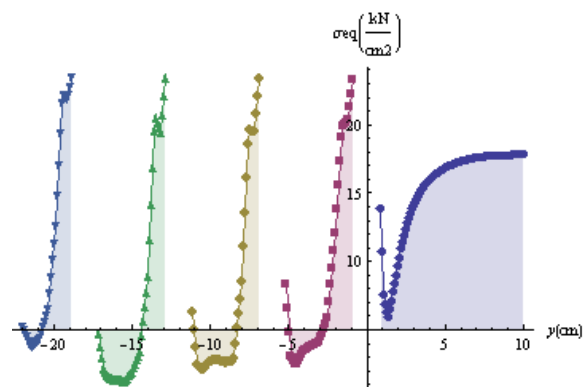
Slika 156: Misesova napetost po prerezu 4



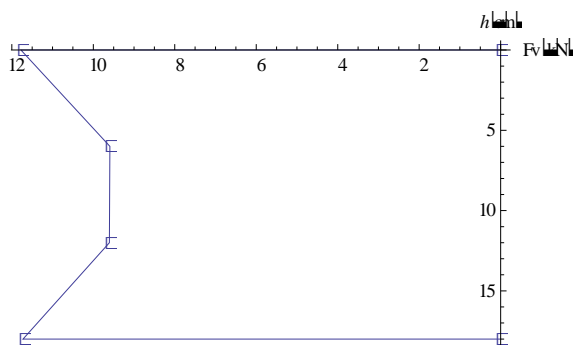
Slika 157: Misesova napetost po prerezu 5



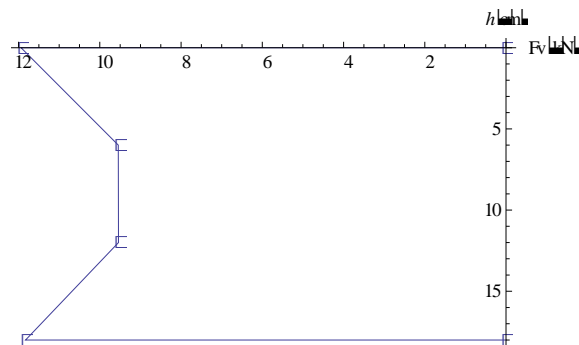
Slika 158: Misesova napetost po prerezu 6



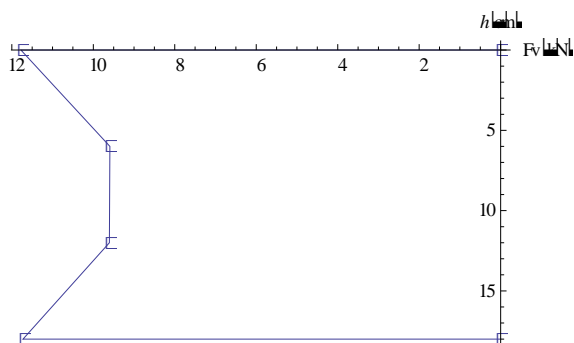
Slika 159: Misesova napetost po prerezu 7



Slika 160: Sile v vijakih V1, V3, V5 in V7



Slika 161: Sile v vijakih V2, V4, V6 in V8



Slika 162: Sile v vijakih V9, V10, V11 in V12

6.7.4 Mejne sile

Za primer 7 sem naredil še sedem variant analiz s programom AceFEM, pri katerih sem spreminjal različne parametre. Spreminjal sem gostoto mreže končnih elementov, ravninsko deformacijsko (RDS) ali ravninsko napetostno stanje (RNS) in funkcijo SmoothMesh, ki generira »boljšo« mrežo končnih elementov, ki se bolj prilega geometriji stika. Pri vseh analizah sem izpisal in primerjal mejno silo F_u (preglednica 7).

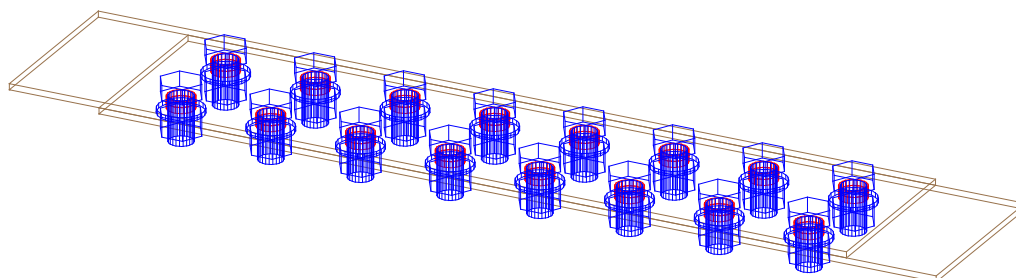
Preglednica 7: Mejne sile F_u

Varianta	Predpostavke v AceFEM-u	Mejna sila F_u [kN]
A	RDS, navadna mreža, SmoothMesh-izključen	172,30
B	RDS, gosta mreža, SmoothMesh-izključen	168,28
C	RNS, navadna mreža, SmoothMesh-izključen	125,44
D	RNS, gosta mreža, SmoothMesh-izključen	125,09
E	RDS, navadna mreža, SmoothMesh-vključen	172,05
F	RDS, gosta mreža, SmoothMesh-vključen	170,88
G	RNS, navadna mreža, SmoothMesh-vključen	128,25
H	RNS, gosta mreža, SmoothMesh-vključen	127,86
EN 1993-1-8	Merodajno: $N_{u,k}$	163,29

Pri primeru 7 merodajno porušitev predstavlja natezna porušitev po neto prerezu. Standard pri kontroli neto prereza upošteva utrjevanje materiala, saj formula vsebuje natezno trdnost f_u . Prav tako standard upošteva ugodne vplive prostorskega napetostnega stanja v okolici vijaka. Zaradi tega pride do razlike med rezultati numeričnih analiz in rezultati računa po EN 1993-1-8. Pri vseh variantah numerične analize kjer sem predpostavil ravninsko napetostno stanje, sem dobil precej manjšo mejno silo F_u , kot pri variantah z ravninskim deformacijskim stanjem. Do tega pride, ker ravninsko deformacijsko stanje določa da je deformacija $\varepsilon_{zz} = 0$ in s tem predpostavi konstanten prečni prerez pločevine, med deformiranjem v smeri delovanja obtežbe. Pri ravninskem deformacijskem stanju pride do nastanka prostorskega napetostnega stanja, ki poveča nosilnost materiala. Pri vseh variantah numerične analize, kjer sem uporabil gostejšo mrežo končnih elementov sem dobil manjšo mejno silo F_u , vendar pa se je s tem bistveno podaljšal čas analize. V vseh variantah numerične analize je funkcija SmoothMesh povečala mejno silo F_u . Pri silah v vijakih že pride do zmanjšanja sil pri srednjih vijakih, vendar gre še vedno za kratek stik.

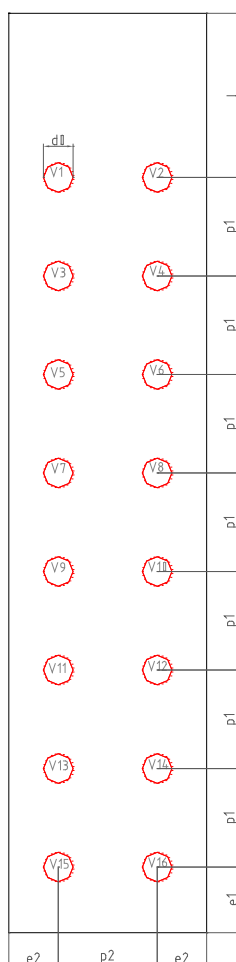
6.8 Primer 8-šestnajst vijakov (nateg)

Računal sem mejno nosilnost natezno obremenjenega vijčenega stika, sestavljenega iz dveh simetričnih pločevin in šestnajstih vijakov (slika 163).



Slika 163: Skica primera 8

6.8.1 Geometrija pločevine



Slika 164: Geometrija pločevine primera 8

6.8.2 Račun nosilnosti po EN 1993-1-8

Jeklo: S235

Vijaki: M16 (8.8)

$$f_y = 23,5 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

$$f_{ub} = 80 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

$$th = 4 \text{ mm}$$

$$d = 16 \text{ mm}$$

$$d_0 = 18 \text{ mm}$$

$$e_1 = 40 \text{ mm}$$

$$e_2 = 30 \text{ mm}$$

$$p_1 = 60 \text{ mm}$$

$$p_2 = 60 \text{ mm}$$

$$l = 100 \text{ mm}$$

a) Strižna nosilnost vijakov

$$F_{V,k} = \alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A = 0,6 \cdot 80 \cdot 2,01 = 96,48 \text{ kN}$$

$$\beta_{Lf} = 1 - \frac{L_j - 15 \cdot d}{200 \cdot d} = 1 - \frac{42 - 15 \cdot 1,6}{200 \cdot 1,6} = 0,94$$

$$F'_{V,k} = F_{V,k} \cdot \beta_{Lf} = 96,48 \cdot 0,94 = 90,69 \text{ kN}$$

$$\sum F'_{V,k} = n \cdot F'_{V,k} = 16 \cdot 90,69 = 1451,04 \text{ kN}$$

-faktor β_{izr} izračunan iz numerične simulacije:

$$F = \sum F_i = F_u = 83,17 \text{ kN}$$

$$\bar{F} = \frac{F_u}{n_{vijakov}} = \frac{83,17}{16} = 5,19 \text{ kN}$$

$$\beta_{izr} = \frac{\bar{F}}{F_{\max}} = \frac{5,19}{5,94} = 0,87$$

b) Kontrola bočnih pritiskov

-Robni vijaki

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{80}{36} = 2,22 \\ 1,0 \\ \frac{e_1}{3 \cdot d_0} = \frac{40}{3 \cdot 18} = 0,74 \end{array} \right\}$$

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \cdot \frac{30}{18} - 1,7 = 2,97 \\ 2,5 \end{array} \right\}$$

$$F_{b,k(robni)} = k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t = 2,5 \cdot 0,74 \cdot 36 \cdot 1,6 \cdot 0,4 = 42,62kN$$

-Notranji vijaki

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{80}{36} = 2,22 \\ 1,0 \\ \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4} = \frac{60}{3 \cdot 18} - \frac{1}{4} = 0,86 \end{array} \right\}$$

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 \cdot \frac{60}{18} - 1,7 = 2,97 \\ 2,5 \end{array} \right\}$$

$$F_{b,k(notranji)} = k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t = 2,5 \cdot 0,86 \cdot 36 \cdot 1,6 \cdot 0,4 = 49,53kN$$

-Celoten stik

$$\sum F_{b,k} = n_n \cdot F_{b,k(notranji)} + n_r \cdot F_{b,k(robni)} = 14 \cdot 49,53 + 2 \cdot 42,62 = 778,66kN$$

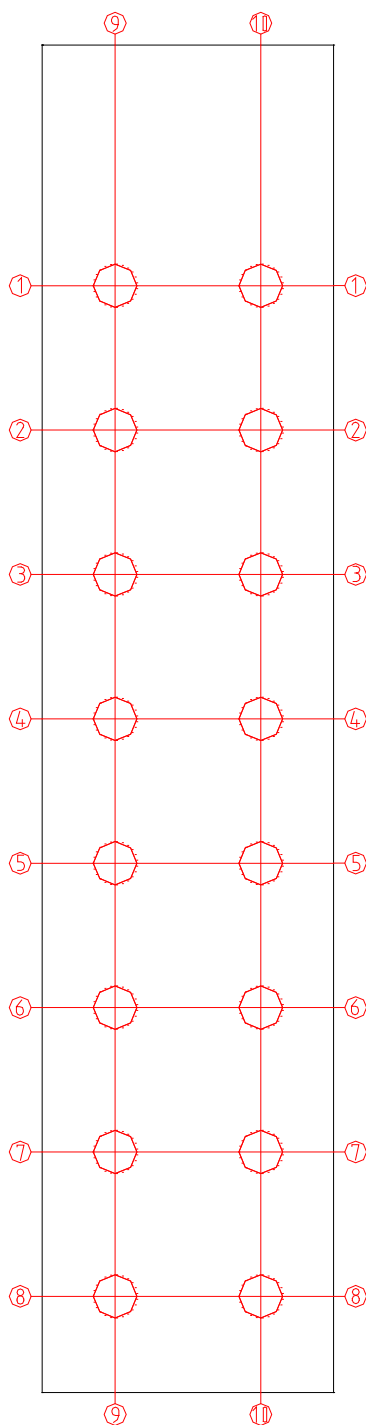
c) Kontrola bruto in neto prereza

$$N_{pl,k} = A \cdot f_y = 12 \cdot 0,4 \cdot 23,5 = 112,8kN \text{ -bruto prerez}$$

$$N_{u,k} = 0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u = 0,9 \cdot 8,4 \cdot 0,4 \cdot 36 = 108,86kN \text{ -neto prerez}$$

6.8.3 Analiza s programom AceFEM

Med analizo sem izrisoval silo F , v odvisnosti od pomika. Po končani analizi pa sem izrisal grafe napetosti σ_{yy} in Misesove napetosti po prečnih in vzdolžnih prerezih pločevine (slika 165). Na koncu sem izrisal tudi grafe sil v vijakih.

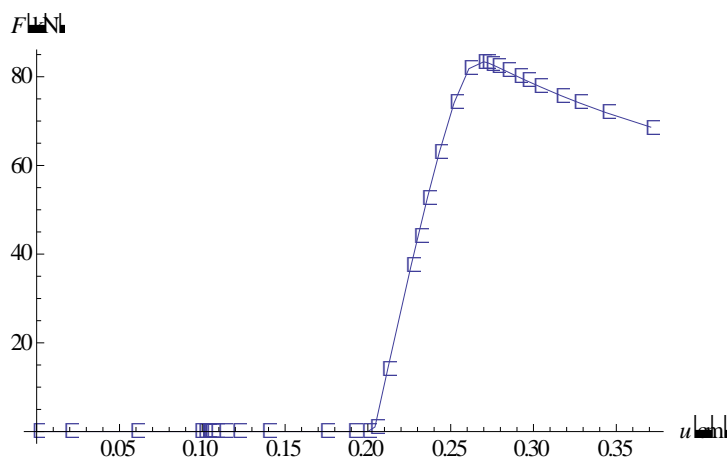


Slika 165: Prerezi za primer 8

6.8.3.1 Varianta G

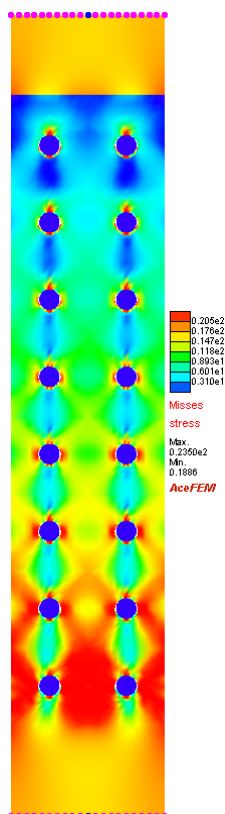
Predpostavke v AceFEM-u:

- ravninsko napetostno stanje
- navadna gostota mreže
- funkcija SmoothMesh je vključena

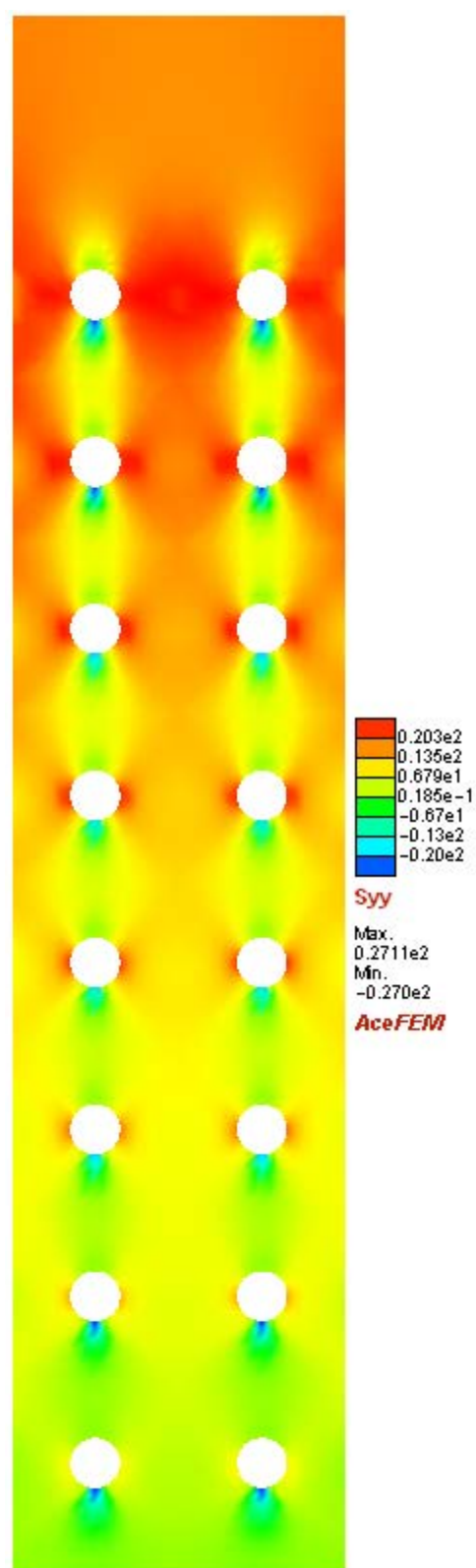
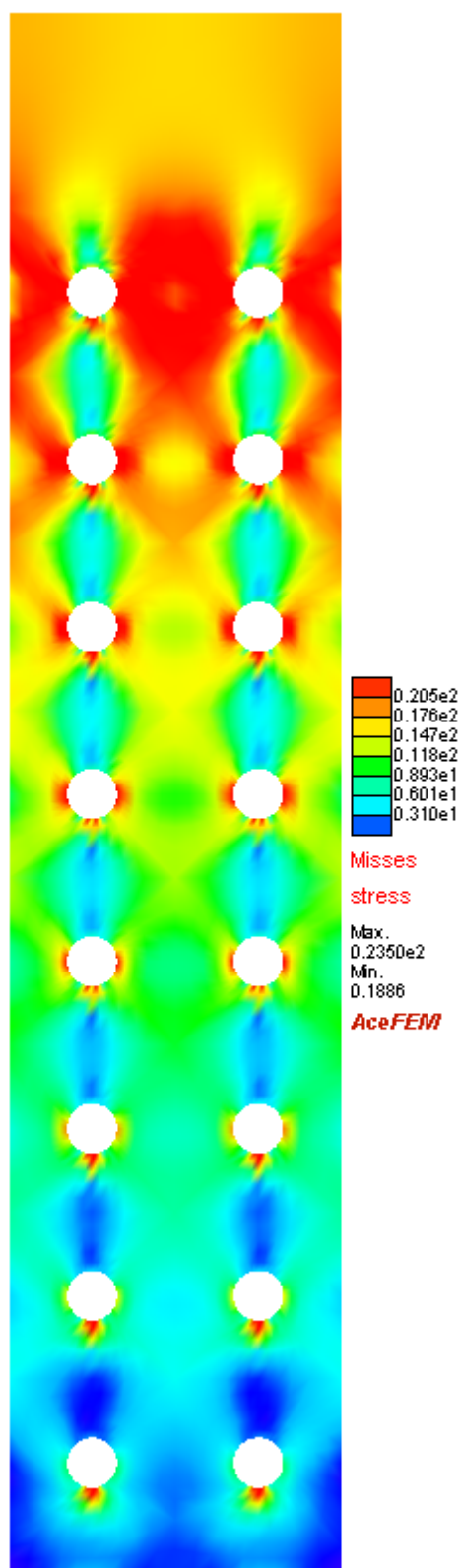


Slika 166: Sila-pomik

Mejna sila $F_u=83,17\text{kN}$

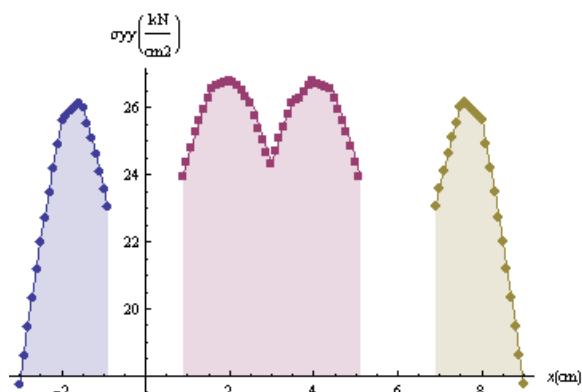


Slika 167: Misesova napetost po stiku

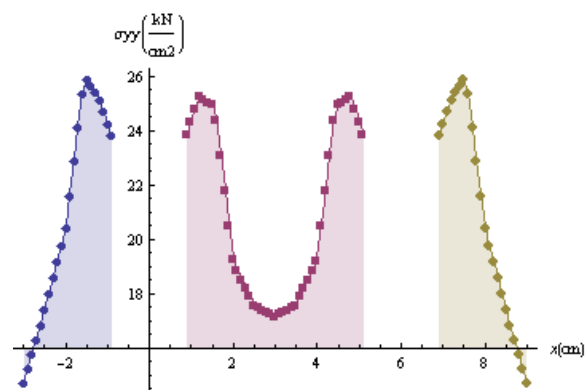


Slika 168: Misesova napetost po pločevini

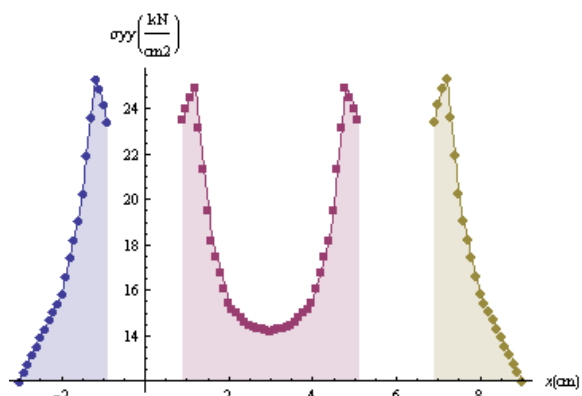
Slika 169: Napetost σ_{yy} po pločevini



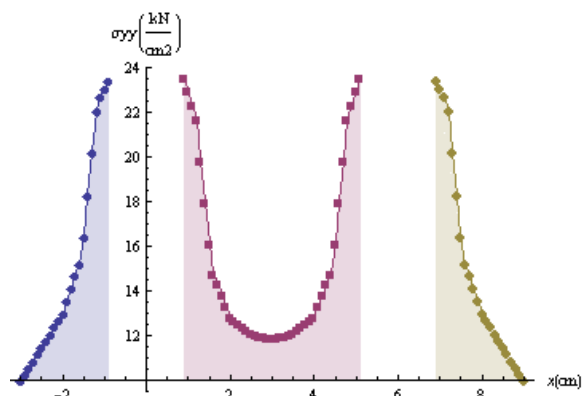
Slika 170: σ_{yy} po prerezu 1



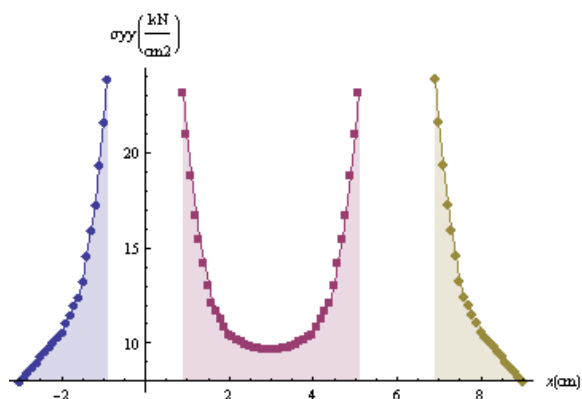
Slika 171: σ_{yy} po prerezu 2



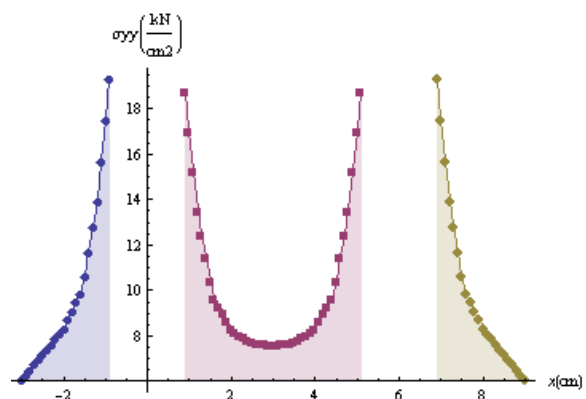
Slika 172: σ_{yy} po prerezu 3



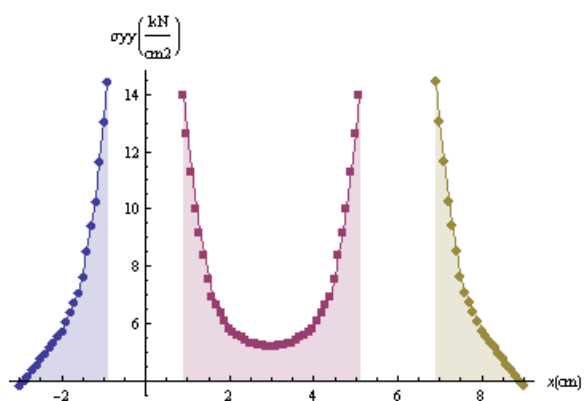
Slika 173: σ_{yy} po prerezu 4



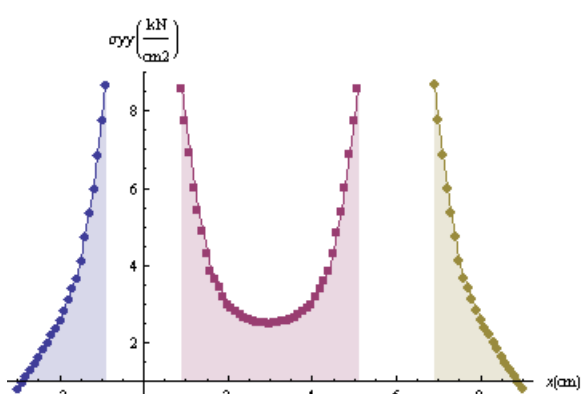
Slika 174: σ_{yy} po prerezu 5



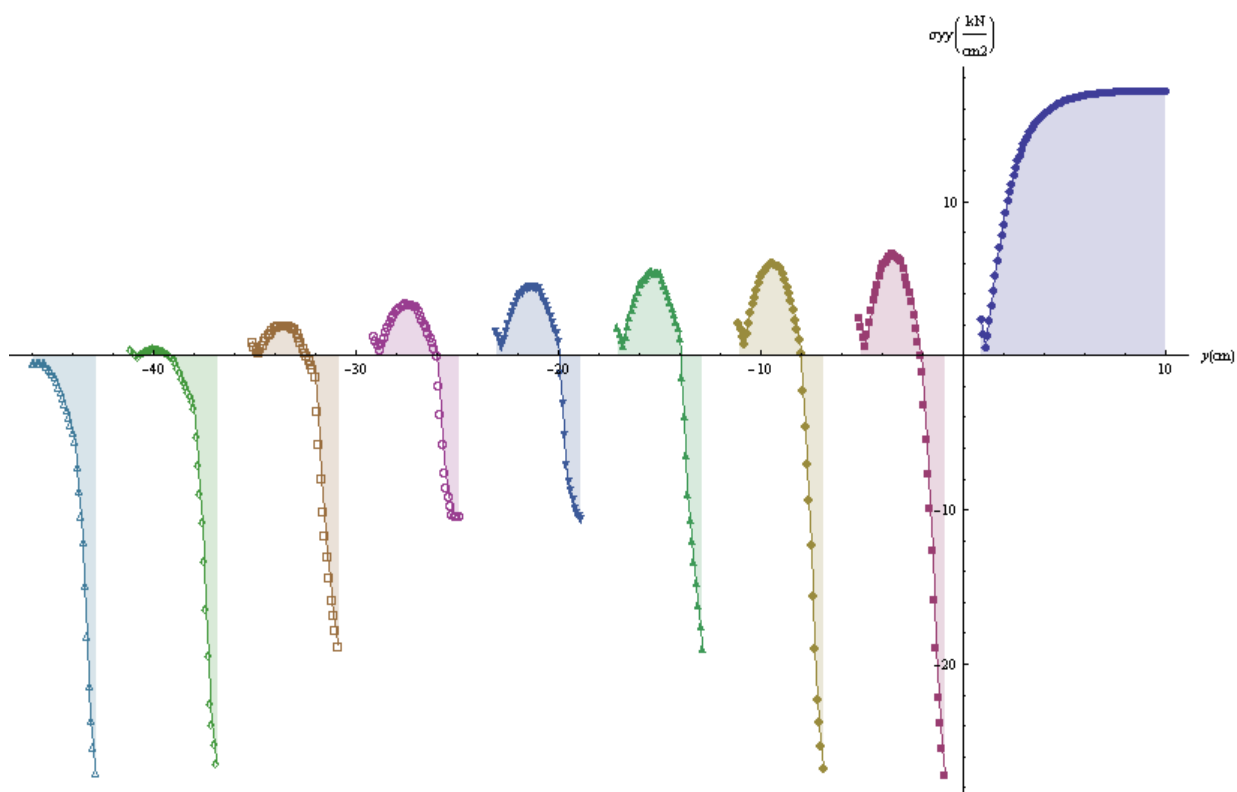
Slika 175: σ_{yy} po prerezu 6



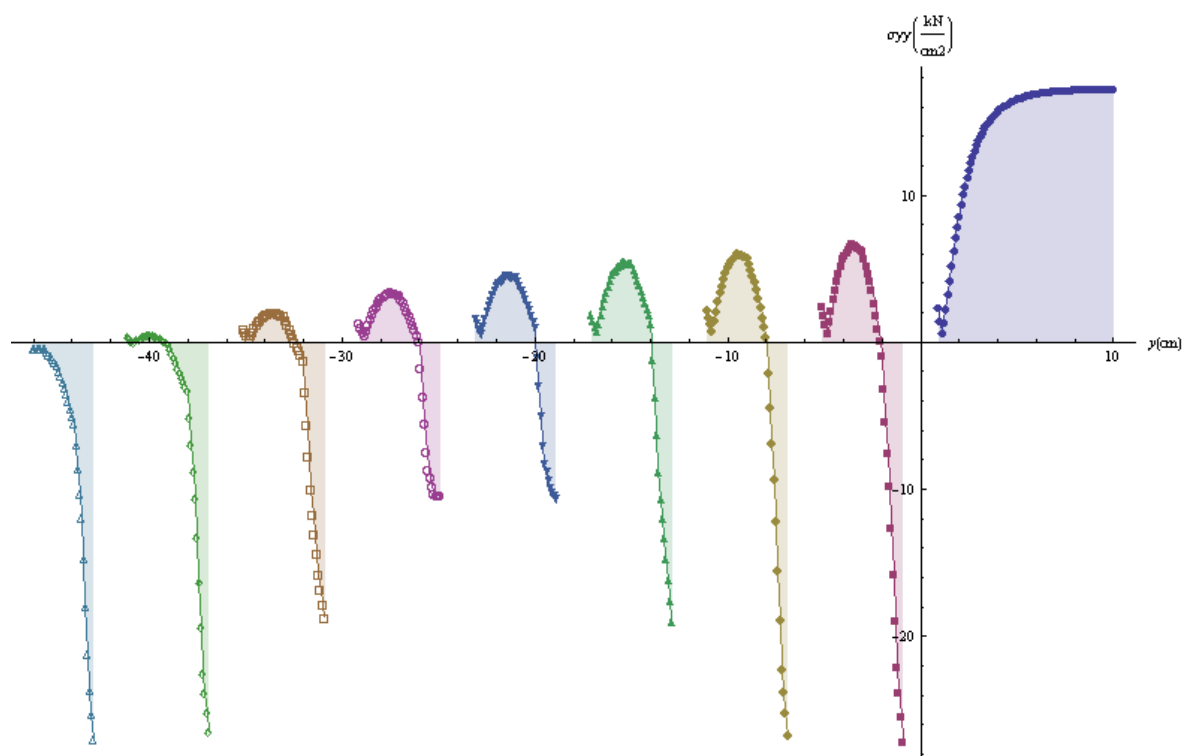
Slika 176: σ_{yy} po prerezu 7



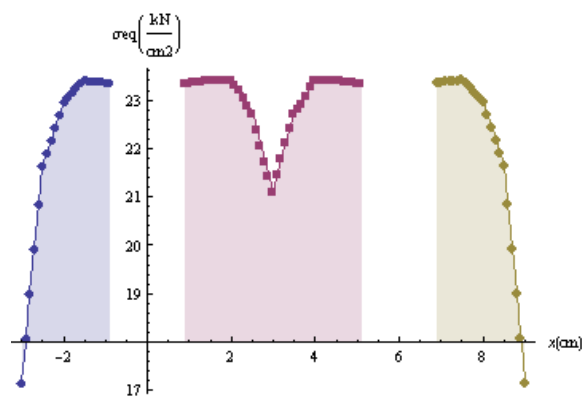
Slika 177: σ_{yy} po prerezu 8



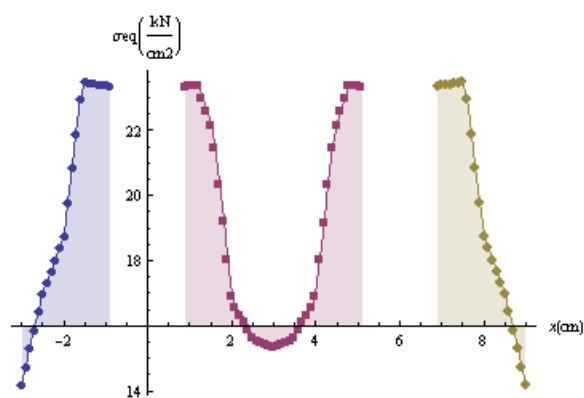
Slika 178: σ_{yy} po prerezu 9



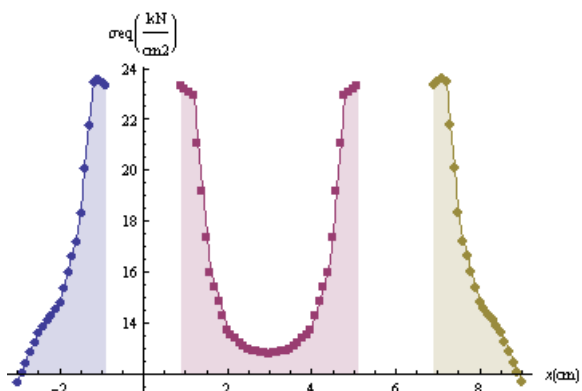
Slika 179: σ_{yy} po prerezu 10



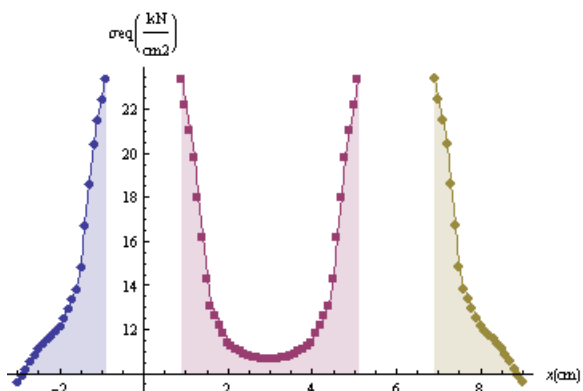
Slika 180: Misesova napetost po prerezu 1



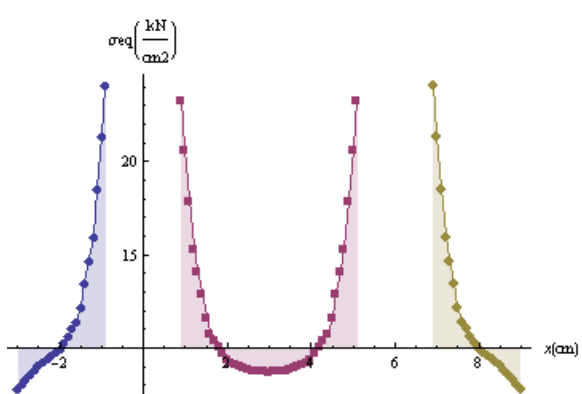
Slika 181: Misesova napetost po prerezu 2



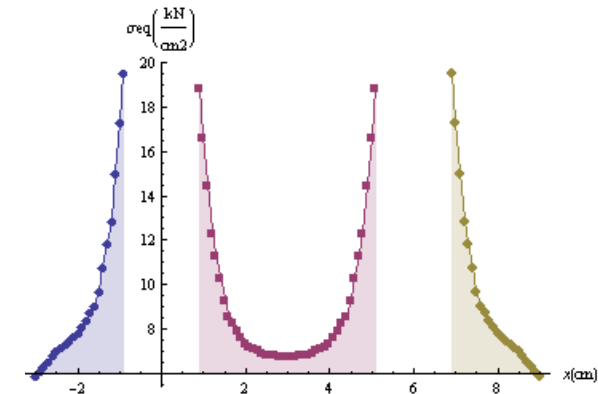
Slika 182: Misesova napetost po prerezu 3



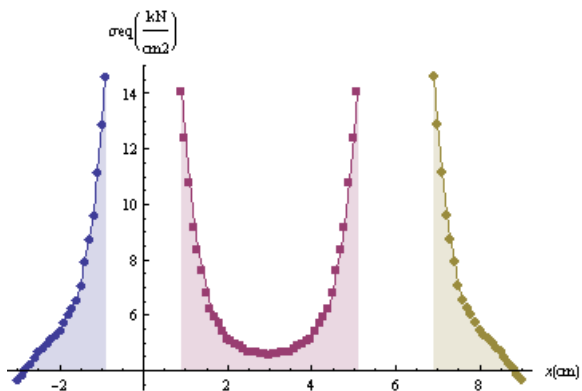
Slika 183: Misesova napetost po prerezu 4



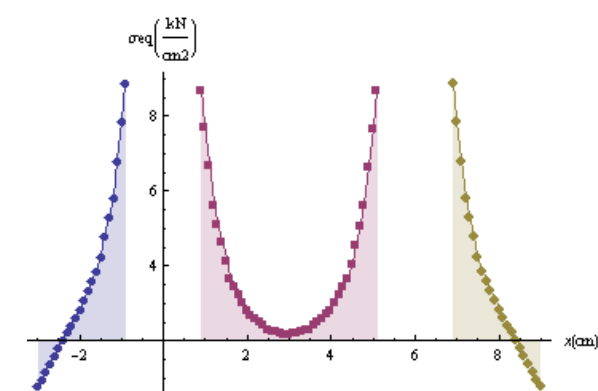
Slika 184: Misesova napetost po prerezu 5



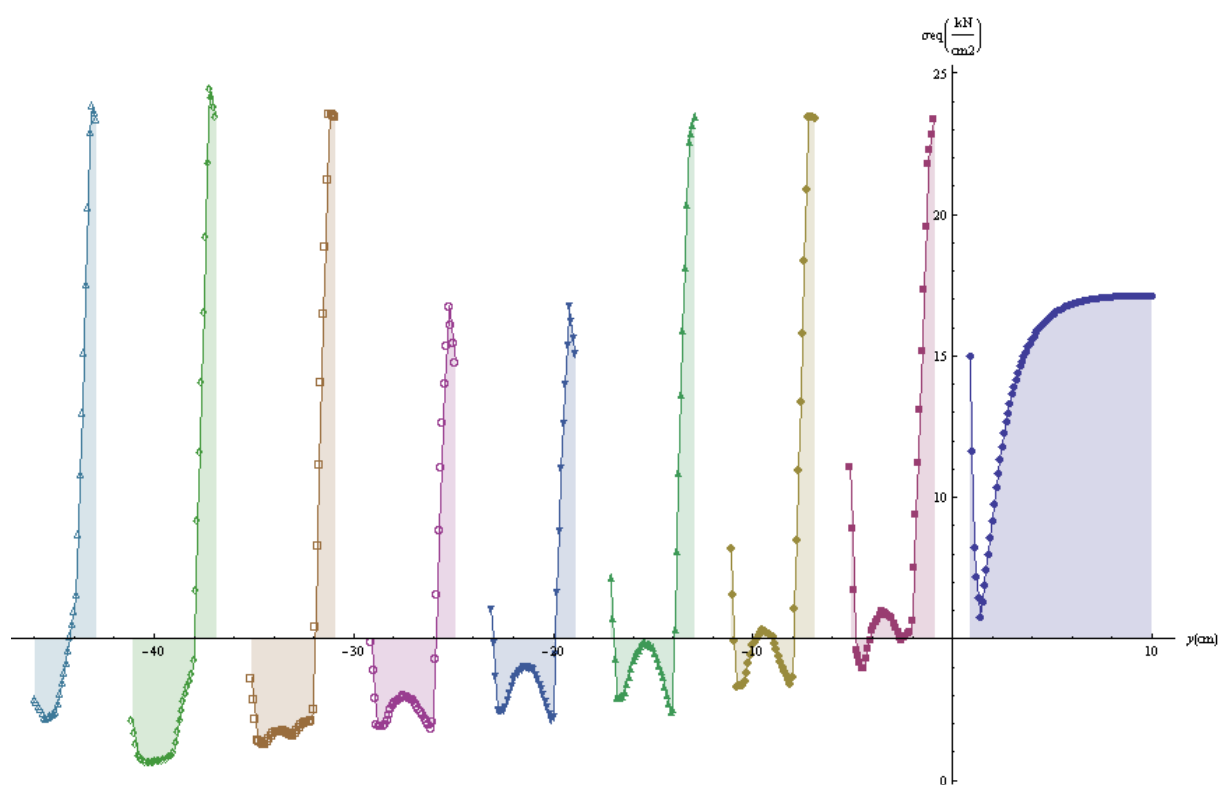
Slika 185: Misesova napetost po prerezu 6



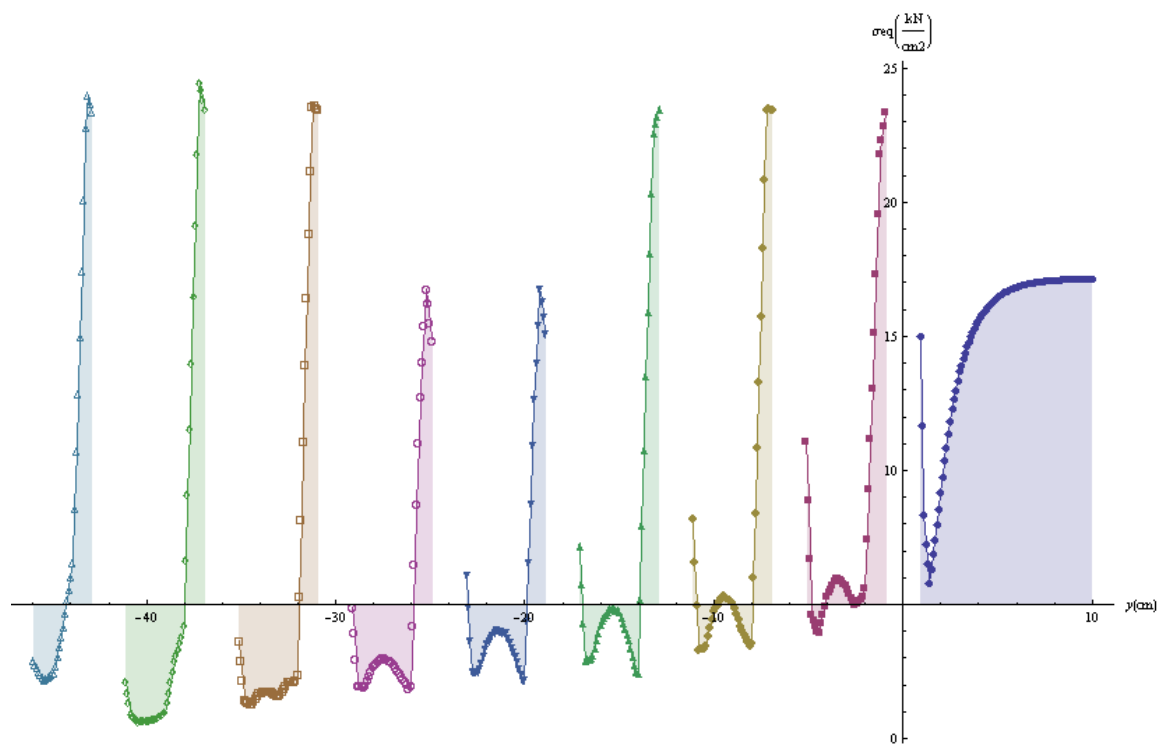
Slika 186: Misesova napetost po prerezu 7



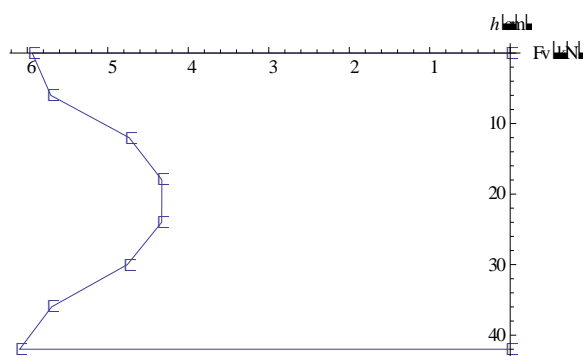
Slika 187: Misesova napetost po prerezu 8



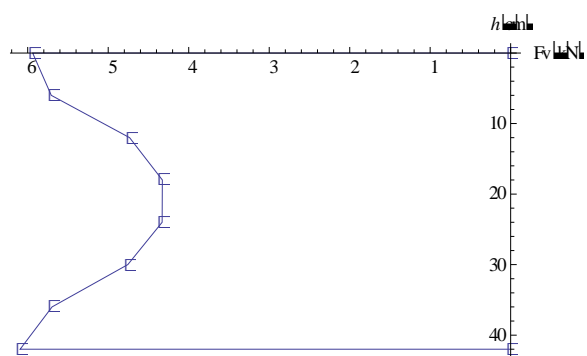
Slika 188: Misesova napetost po prerezu 9



Slika 189: Misesova napetost po prerezu 10



Slika 190: Sile v vijakih V1, V3, V5, V7, V9, V11, V13 in V15



Slika 191: Sile v vijakih V2, V4, V6, V8, V10, V12, V14 in V16

6.8.4 Mejne sile

Za primer 8 sem naredil še sedem variant analiz s programom AceFEM, pri katerih sem spreminjal različne parametre. Spreminjal sem gostoto mreže končnih elementov, ravninsko deformacijsko (RDS) ali ravninsko napetostno stanje (RNS) in funkcijo SmoothMesh, ki generira »boljšo« mrežo končnih elementov, ki se bolj prilega geometriji stika. Pri vseh analizah sem izpisal in primerjal mejno silo F_u (preglednica 8).

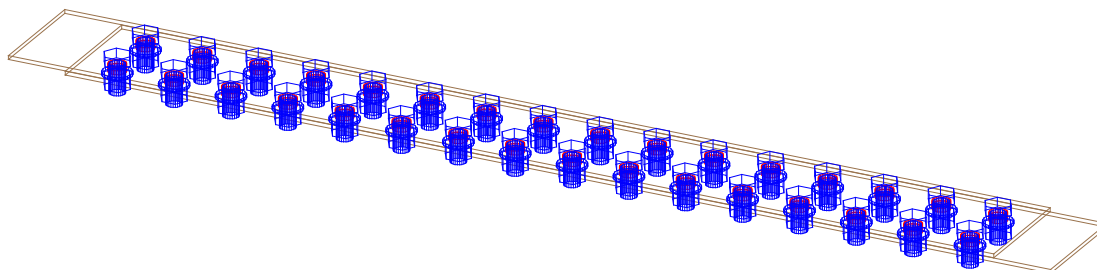
Preglednica 8: Mejne sile F_u

Varianta	Predpostavke v AceFEM-u	Mejna sila F_u [kN]
A	RDS, navadna mreža, SmoothMesh-izključen	107,14
B	RDS, gosta mreža, SmoothMesh-izključen	106,60
C	RNS, navadna mreža, SmoothMesh-izključen	82,10
D	RNS, gosta mreža, SmoothMesh-izključen	82,86
E	RDS, navadna mreža, SmoothMesh-vključen	106,50
F	RDS, gosta mreža, SmoothMesh-vključen	106,04
G	RNS, navadna mreža, SmoothMesh-vključen	83,17
H	RNS, gosta mreža, SmoothMesh-vključen	82,97
EN 1998-1-3	Merodajno: $N_{u,k}$	108,86

Pri primeru 8 merodajno porušitev predstavlja natezna porušitev po neto prerezu. Standard pri kontroli neto prereza upošteva utrjevanje materiala, saj formula vsebuje natezno trdnost f_u . Prav tako standard upošteva ugodne vplive prostorskega napetostnega stanja v okolici vijaka. Zaradi tega pride do razlike med rezultati numeričnih analiz in rezultati računa po EN 1993-1-8. Pri vseh variantah numerične analize kjer sem predpostavil ravninsko napetostno stanje, sem dobil precej manjšo mejno silo F_u , kot pri variantah z ravninskim deformacijskim stanjem. Do tega pride, ker ravninsko deformacijsko stanje določa da je deformacija $\varepsilon_{zz} = 0$ in s tem predpostavi konstanten prečni prerez pločevine, med deformiranjem v smeri delovanja obtežbe. Pri ravninskem deformacijskem stanju pride do nastanka prostorskega napetostnega stanja, ki poveča nosilnost materiala. Pri silah v vijakih pride do izrazitega vpada pri sredinskih vijakih, kar smo tudi pričakovali, saj ta stik spada med dolge stike. Redukcijski faktor za dolge stike β_{izr} , ki smo ga izračunali iz rezultatov numerične analize, se dokaj dobro ujema s faktorjem β_{Lf} , ki ga predpisuje standard.

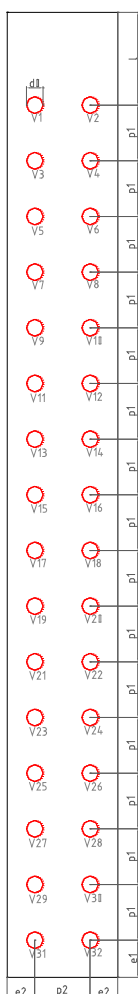
6.9 Primer 9-dvaintrideset vijakov (nateg)

Računal sem mejno nosilnost natezno obremenjenega vijčenega stika, sestavljenega iz dveh simetričnih pločevin in dvaintridesetih vijakov (slika 192).



Slika 192: Skica primera 9

6.9.1 Geometrija pločevine



Slika 193: Geometrija pločevine primera 9

6.9.2 Račun nosilnosti po EN 1993-1-8

Jeklo: S235

Vijaki: M16 (8.8)

$$f_y = 23,5 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

$$f_{ub} = 80 \text{ kN} / \text{cm}^2$$

$$th = 4 \text{ mm}$$

$$d = 16 \text{ mm}$$

$$d_0 = 18 \text{ mm}$$

$$e_1 = 40 \text{ mm}$$

$$e_2 = 30 \text{ mm}$$

$$p_1 = 60 \text{ mm}$$

$$p_2 = 60 \text{ mm}$$

$$l = 100 \text{ mm}$$

a) Strižna nosilnost vijakov

$$F_{V,k} = \alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A = 0,6 \cdot 80 \cdot 2,01 = 96,48 \text{ kN}$$

$$\beta_{Lf} = 1 - \frac{L_j - 15 \cdot d}{200 \cdot d} = 1 - \frac{90 - 15 \cdot 1,6}{200 \cdot 1,6} = 0,79$$

$$F'_{V,k} = F_{V,k} \cdot \beta_{Lf} = 96,48 \cdot 0,79 = 76,22 \text{ kN}$$

$$\sum F'_{V,k} = n \cdot F'_{V,k} = 32 \cdot 76,22 = 2439,04 \text{ kN}$$

-faktor β_{izr} izračunan iz numerične simulacije:

$$F = \sum F_i = F_u = 74,86 \text{ kN}$$

$$\bar{F} = \frac{F_u}{n_{vijakov}} = \frac{74,86}{32} = 2,34 \text{ kN}$$

$$\beta_{izr} = \frac{\bar{F}}{F_{\max}} = \frac{2,34}{6,41} = 0,36$$

b) Kontrola bočnih pritiskov

-Robni vijaki

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{80}{36} = 2,22 \\ 1,0 \\ \frac{e_1}{3 \cdot d_0} = \frac{40}{3 \cdot 18} = 0,74 \end{array} \right\}$$

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \cdot \frac{30}{18} - 1,7 = 2,97 \\ 2,5 \end{array} \right\}$$

$$F_{b,k(\text{robni})} = k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t = 2,5 \cdot 0,74 \cdot 36 \cdot 1,6 \cdot 0,4 = 42,62 \text{ kN}$$

-Notranji vijaki

$$\alpha_b = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{80}{36} = 2,22 \\ 1,0 \\ \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4} = \frac{60}{3 \cdot 18} - \frac{1}{4} = 0,86 \end{array} \right\}$$

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 \cdot \frac{60}{18} - 1,7 = 2,97 \\ 2,5 \end{array} \right\}$$

$$F_{b,k(\text{notranji})} = k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t = 2,5 \cdot 0,86 \cdot 36 \cdot 1,6 \cdot 0,4 = 49,53 \text{ kN}$$

-Celoten stik

$$\sum F_{b,k} = n_n \cdot F_{b,k(\text{notranji})} + n_r \cdot F_{b,k(\text{robni})} = 30 \cdot 49,53 + 2 \cdot 42,62 = 1571,14 \text{ kN}$$

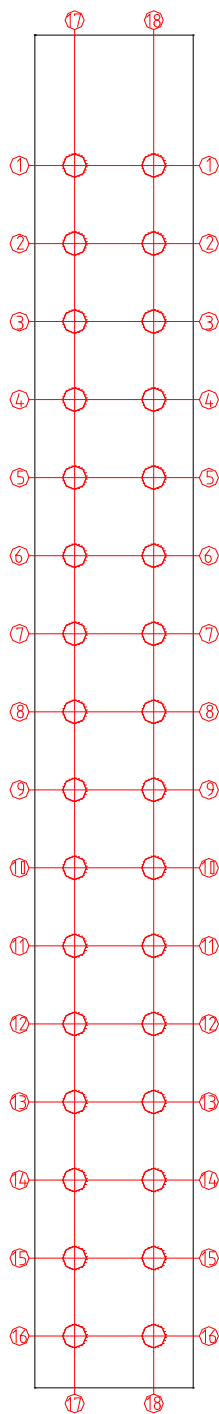
c) Kontrola bruto in neto prereza

$$N_{pl,k} = A \cdot f_y = 12 \cdot 0,4 \cdot 23,5 = 112,8 \text{ kN} \text{ -bruto prerez}$$

$$N_{u,k} = 0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u = 0,9 \cdot 8,4 \cdot 0,4 \cdot 36 = 108,86 \text{ kN} \text{ -neto prerez}$$

6.9.3 Analiza s programom AceFEM

Med analizo sem izrisoval silo F , v odvisnosti od pomika. Po končani analizi pa sem izrisal grafe napetosti σ_{yy} in Misesove napetosti po prečnih in vzdolžnih prerezih pločevine (slika 194). Na koncu sem izrisal tudi grafe sil v vijakih.

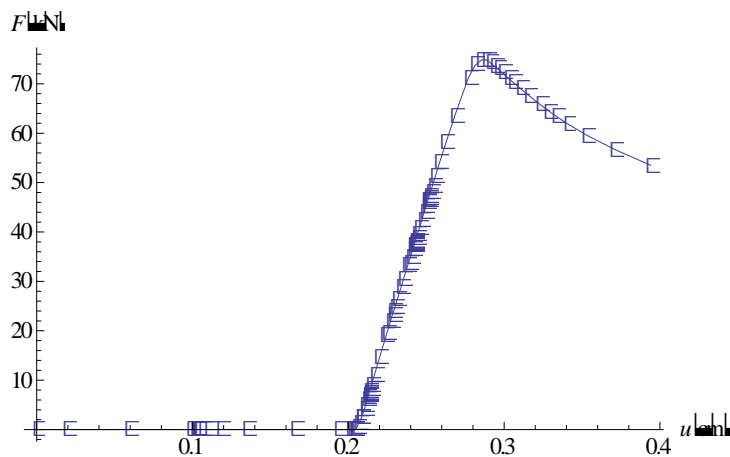


Slika 194: Prerezi za primer 9

6.9.3.1 Varianta D

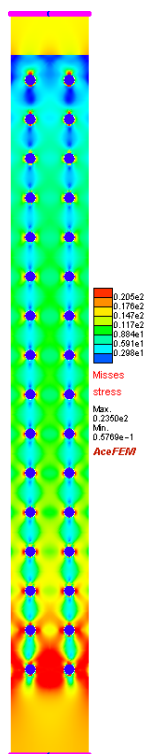
Predpostavke v AceFEM-u:

- ravninsko napetostno stanje
- večja gostota mreže
- funkcija SmoothMesh je izključena

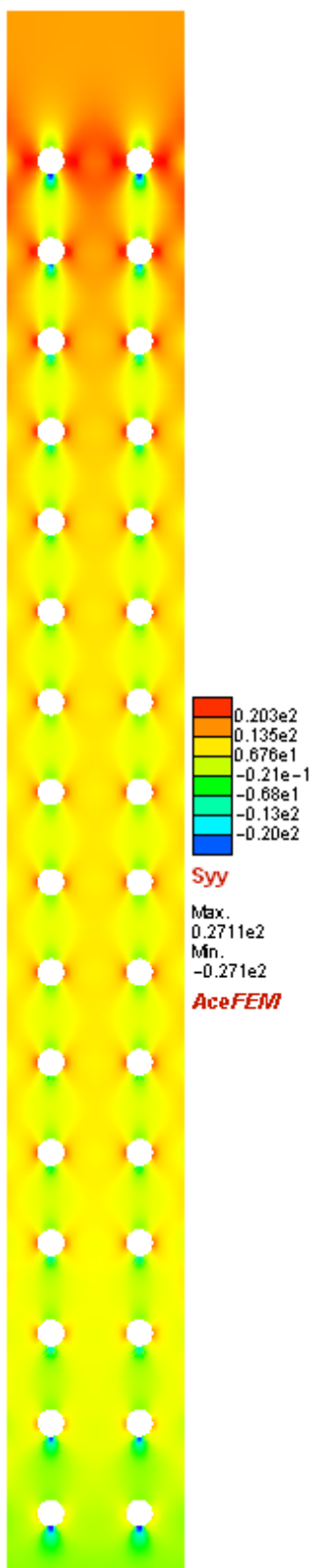


Slika 195: Sila-pomik

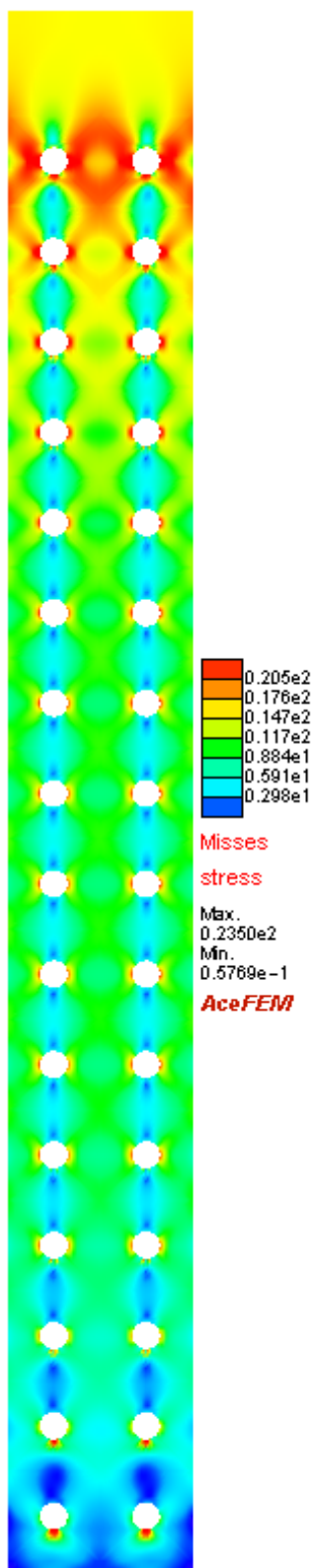
Mejna sila $F_u=74,86\text{kN}$



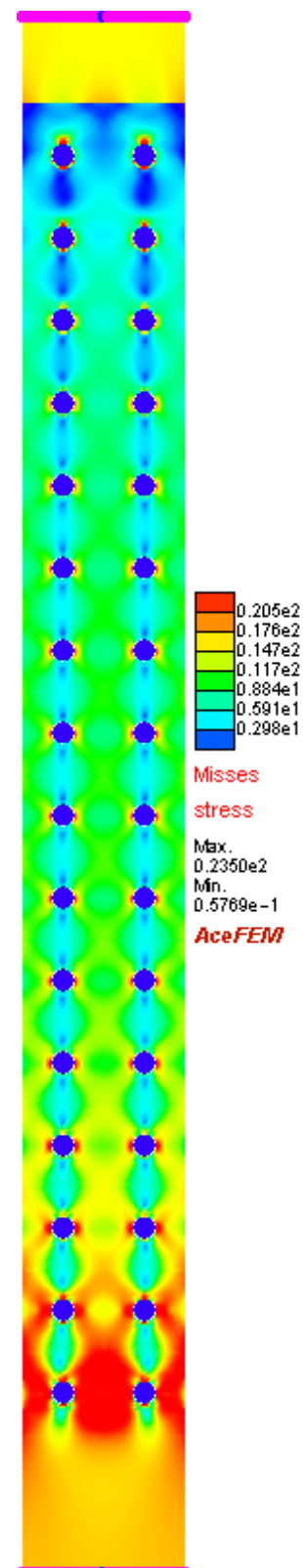
Slika 196: Misesova napetost po stiku



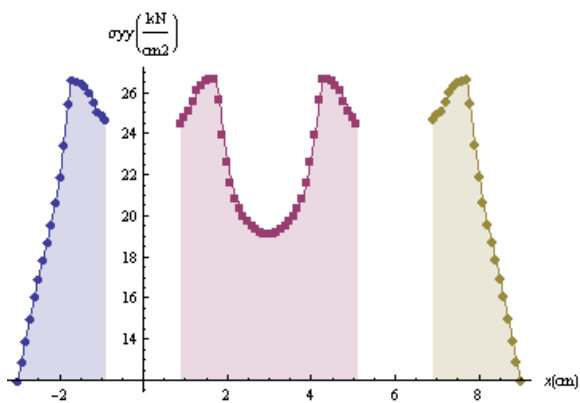
Slika 197: Napetost σ_{yy} po pločevini



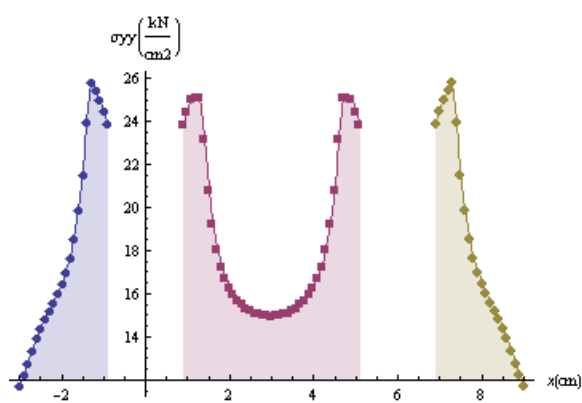
Slika 198: Misesova napetost po pločevini



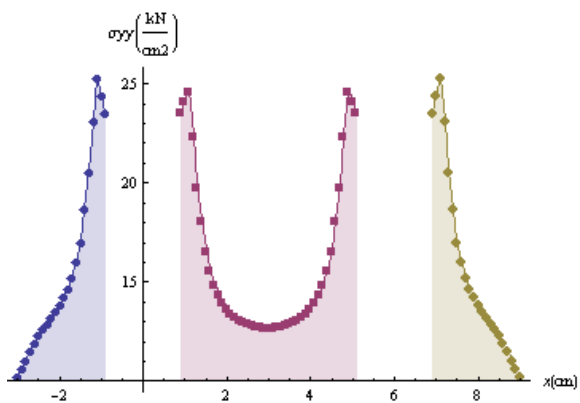
Slika 199: Misesova napetost po stiku



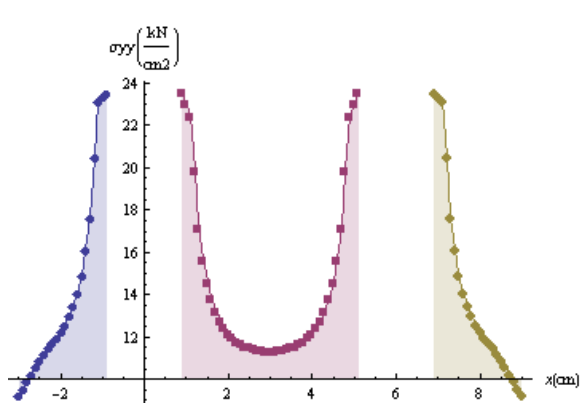
Slika 200: σ_{yy} po prerezu 1



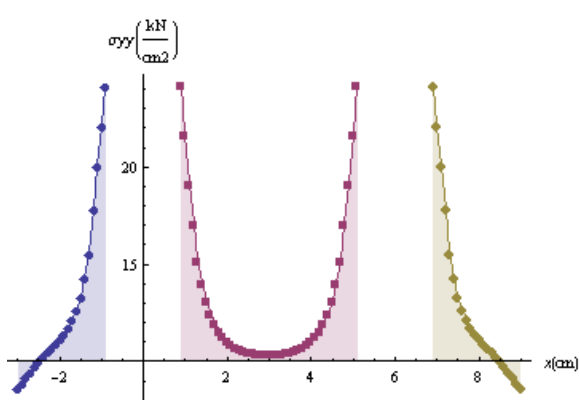
Slika 201: σ_{yy} po prerezu 2



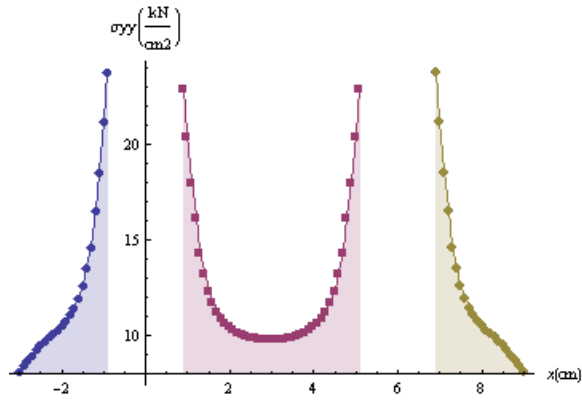
Slika 202: σ_{yy} po prerezu 3



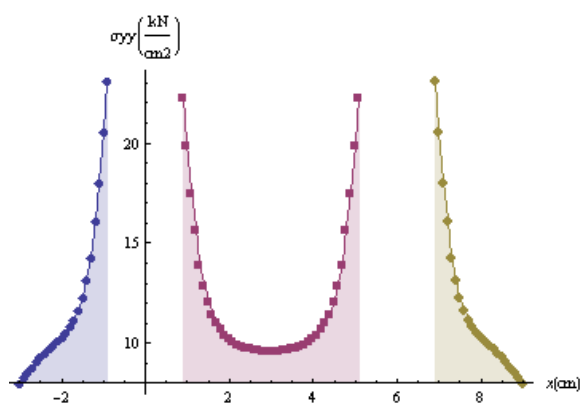
Slika 203: σ_{yy} po prerezu 4



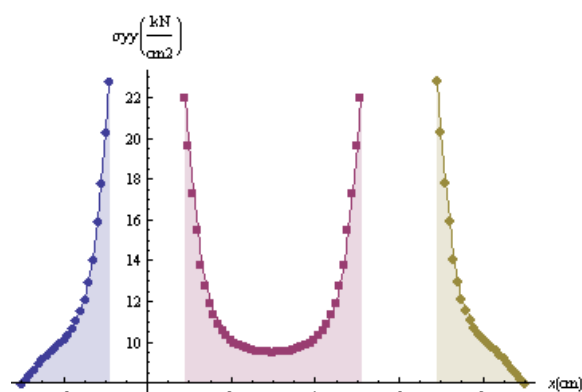
Slika 204: σ_{yy} po prerezu 5



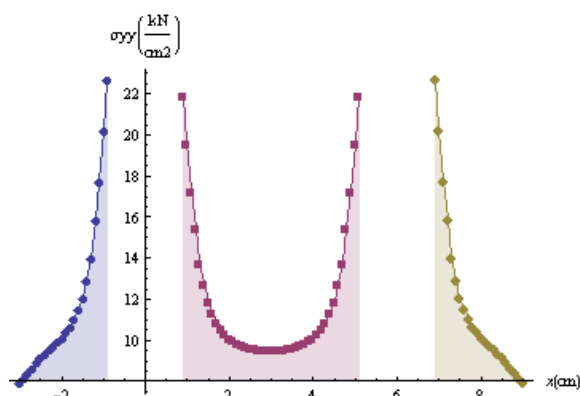
Slika 205: σ_{yy} po prerezu 6



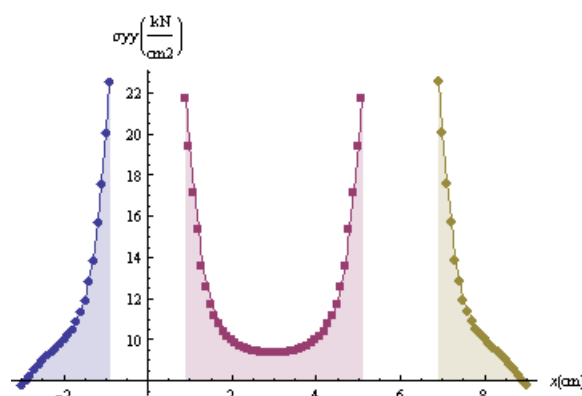
Slika 206: σ_{yy} po prerezu 7



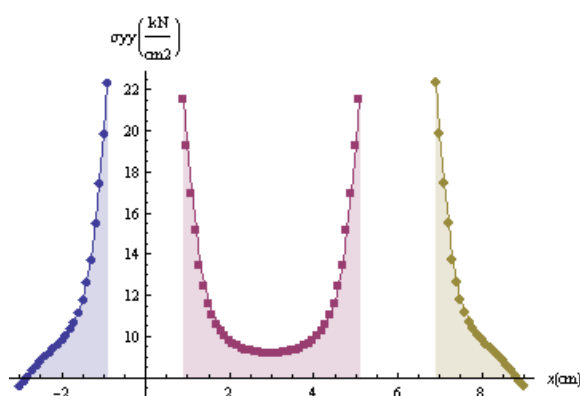
Slika 207: σ_{yy} po prerezu 8



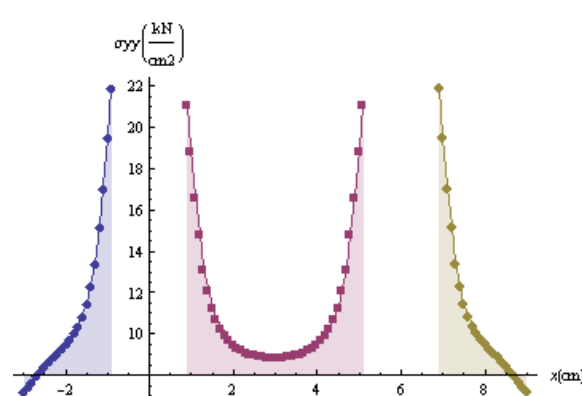
Slika 208: σ_{yy} po prerezu 9



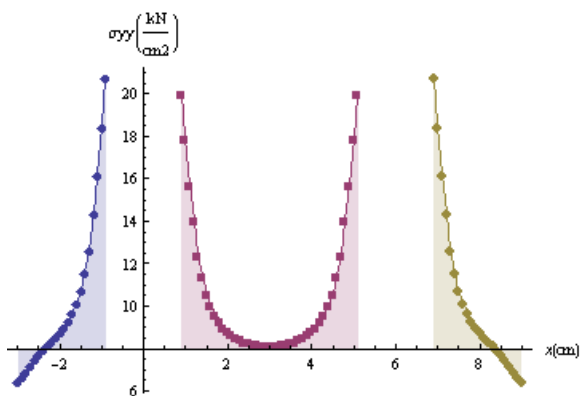
Slika 209: σ_{yy} po prerezu 10



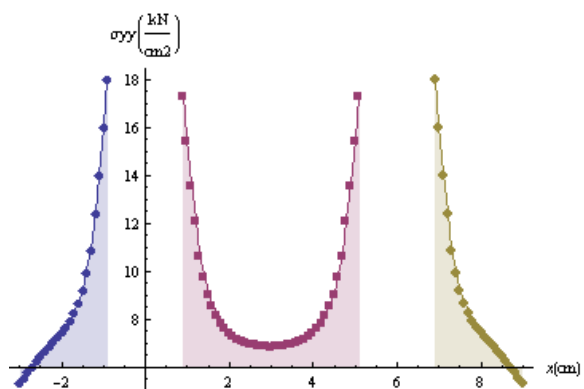
Slika 210: σ_{yy} po prerezu 11



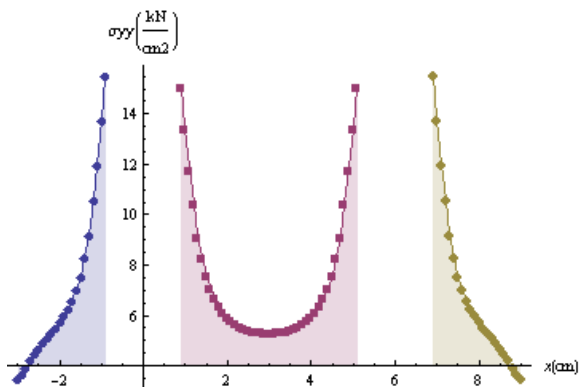
Slika 211: σ_{yy} po prerezu 12



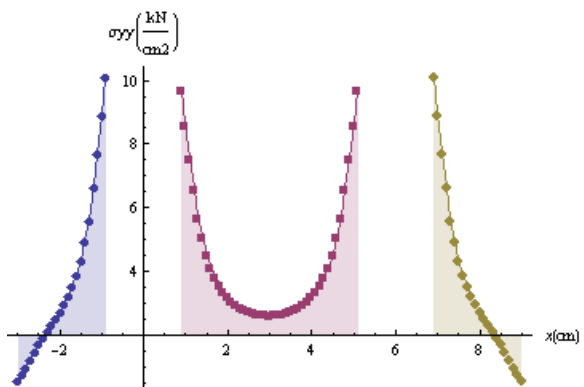
Slika 212: σ_{yy} po prerezu 13



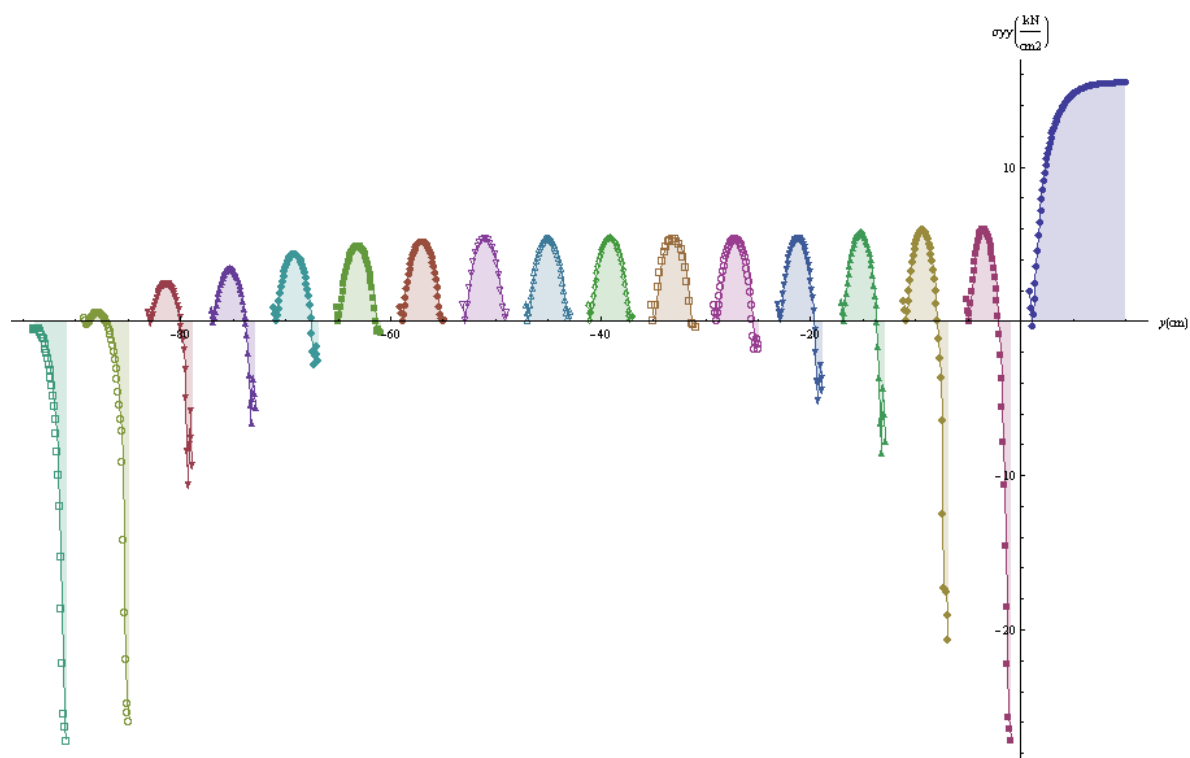
Slika 213: σ_{yy} po prerezu 14



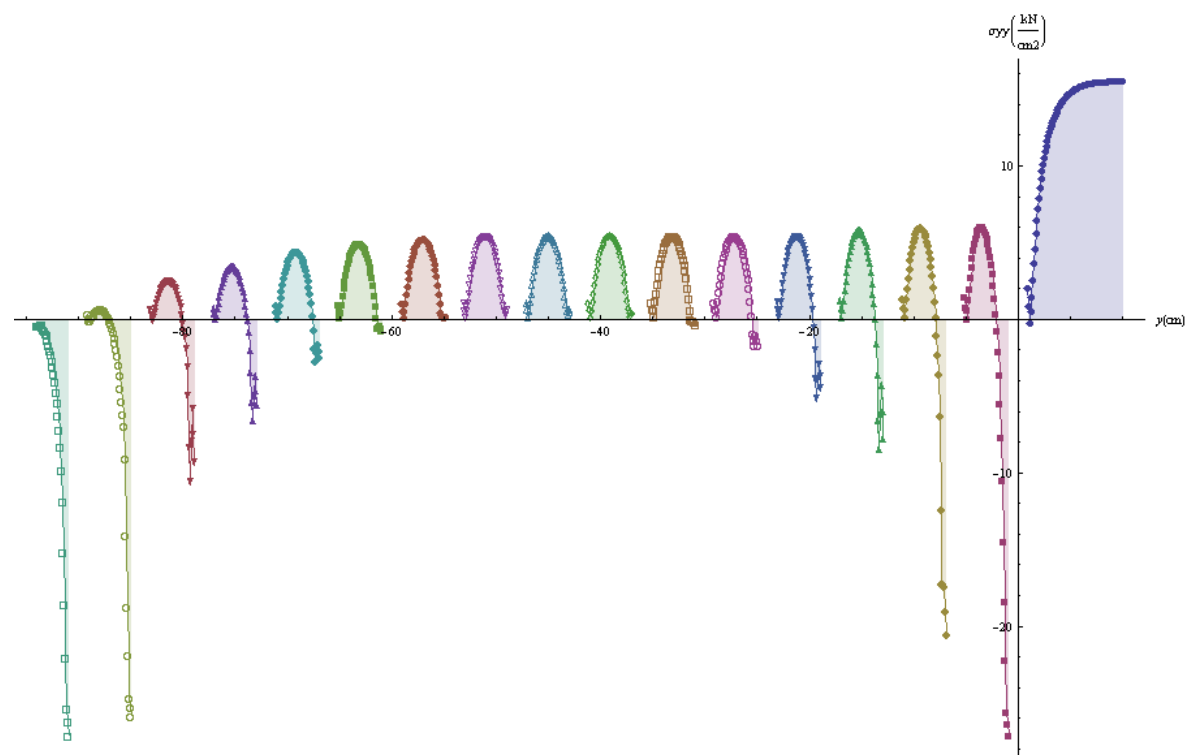
Slika 214: σ_{yy} po prerezu 15



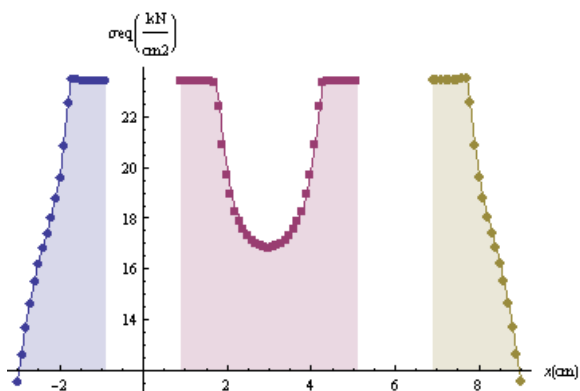
Slika 215: σ_{yy} po prerezu 16



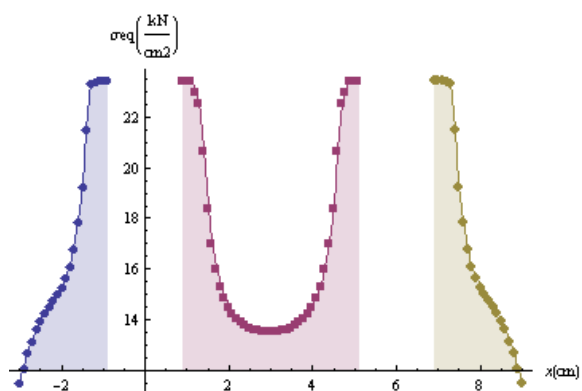
Slika 216: σ_{yy} po prerezu 17



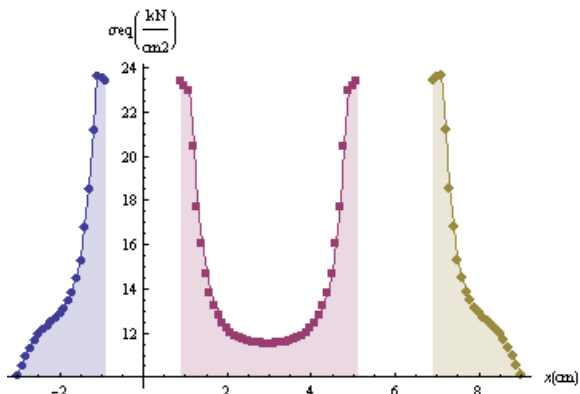
Slika 217: σ_{yy} po prerezu 18



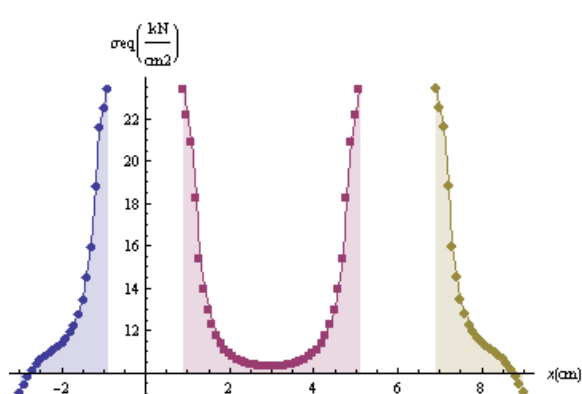
Slika 218: Misesova napetost po prerezu 1



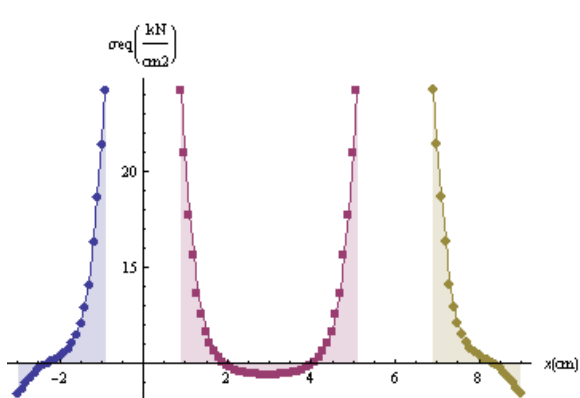
Slika 219: Misesova napetost po prerezu 2



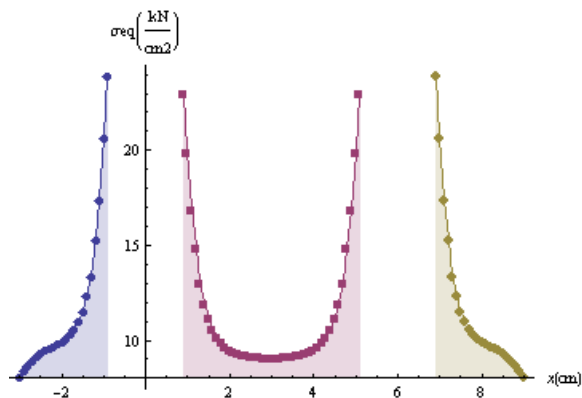
Slika 220: Misesova napetost po prerezu 3



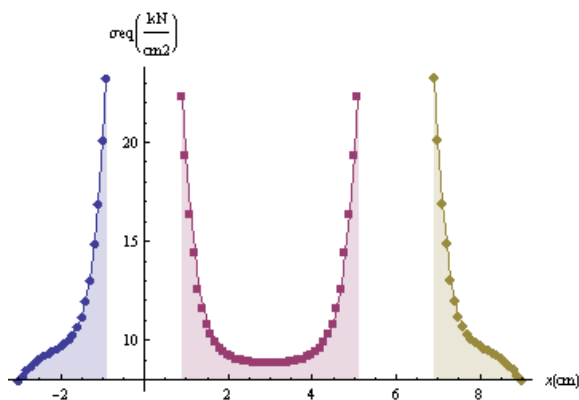
Slika 221: Misesova napetost po prerezu 4



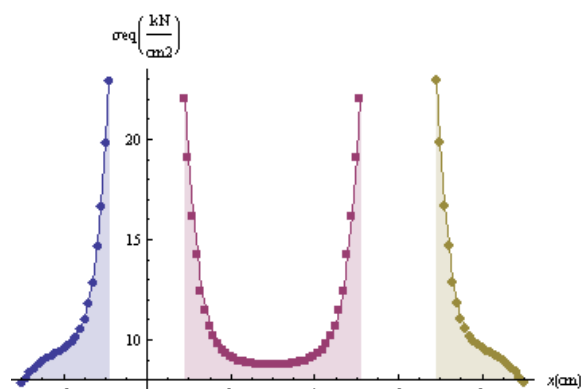
Slika 222: Misesova napetost po prerezu 5



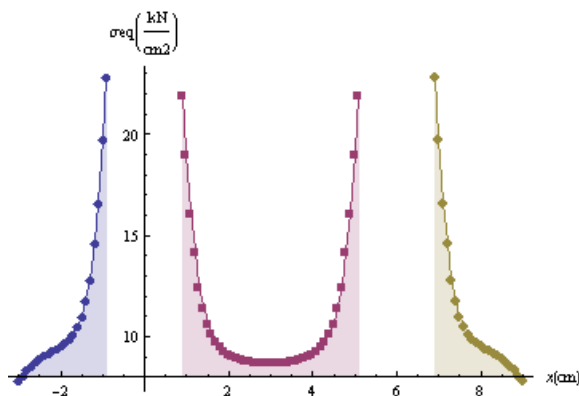
Slika 223: Misesova napetost po prerezu 6



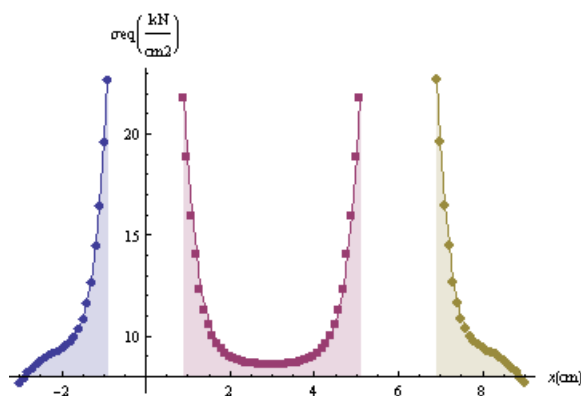
Slika 224: Misesova napetost po prerezu 7



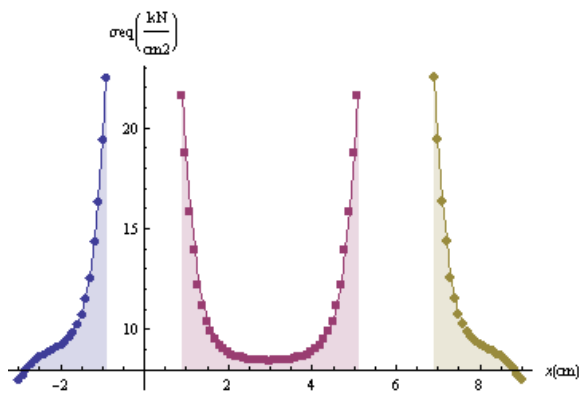
Slika 225: Misesova napetost po prerezu 8



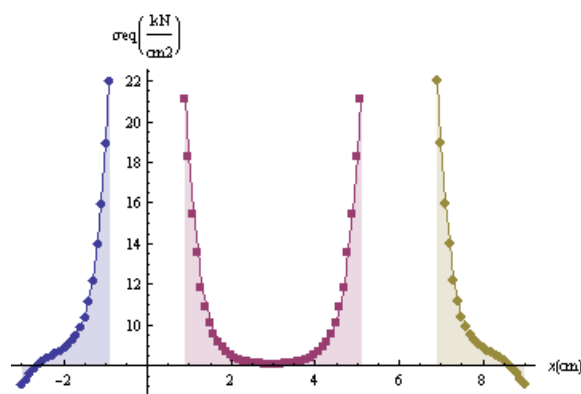
Slika 226: Misesova napetost po prerezu 9



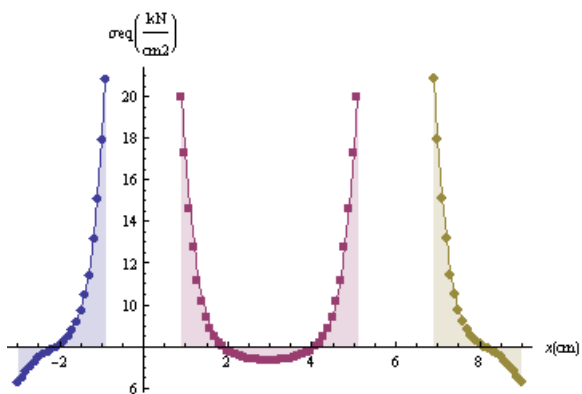
Slika 227: Misesova napetost po prerezu 10



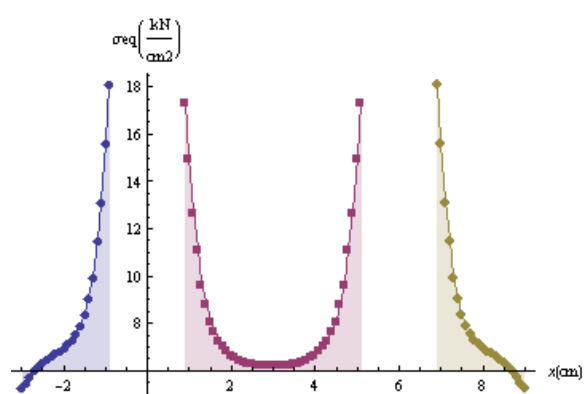
Slika 228: Misesova napetost po prerezu 11



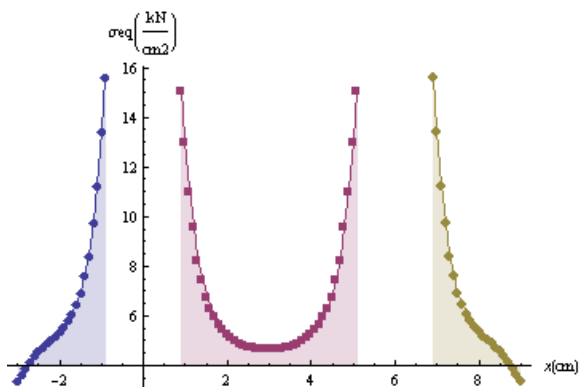
Slika 229: Misesova napetost po prerezu 12



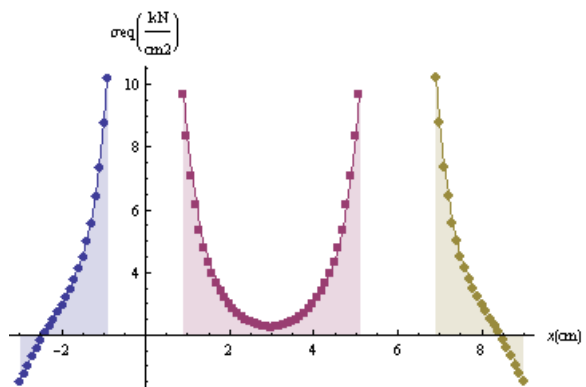
Slika 230: Misesova napetost po prerezu 13



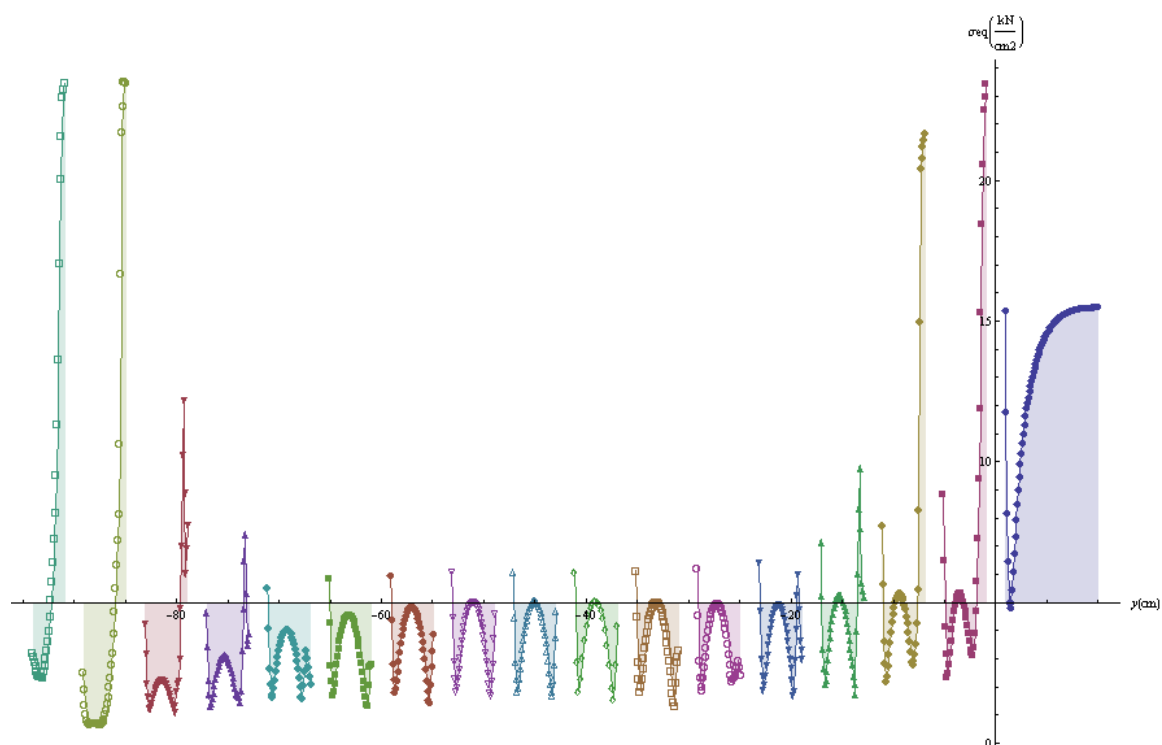
Slika 231: Misesova napetost po prerezu 14



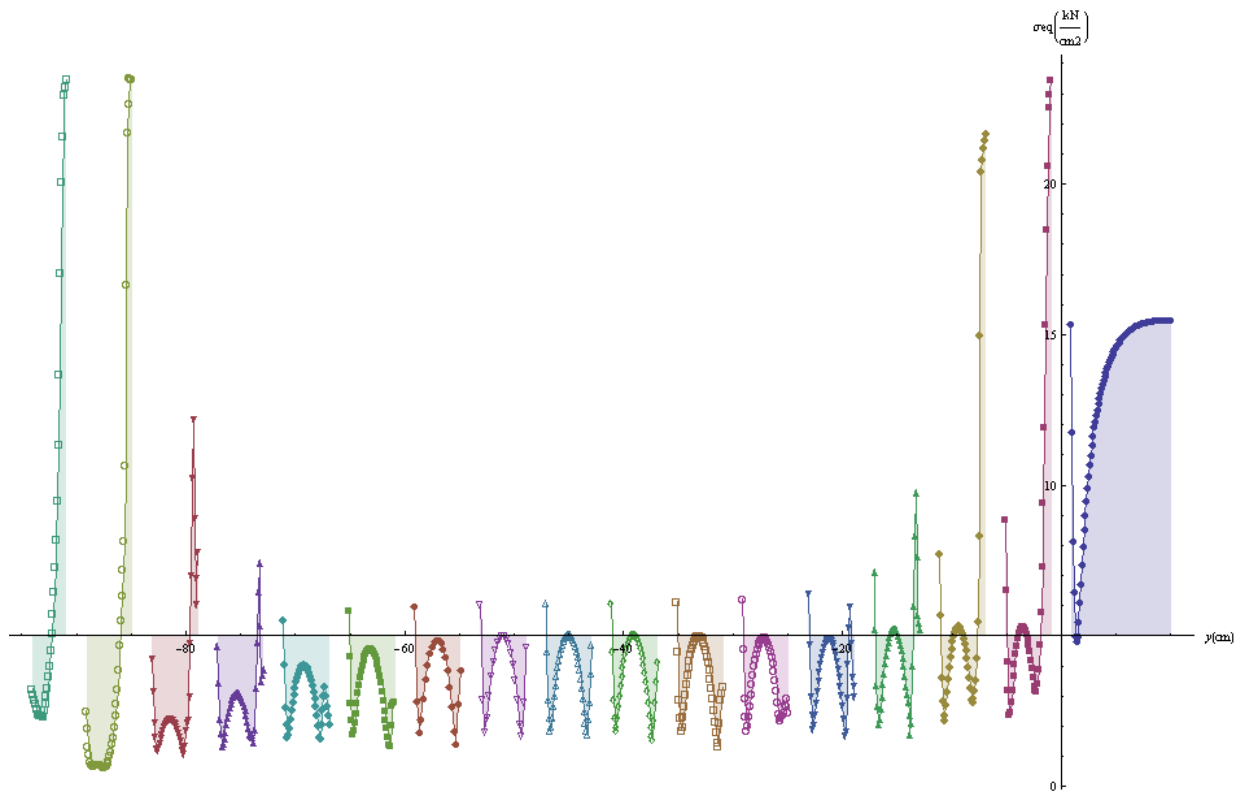
Slika 232: Misesova napetost po prerezu 15



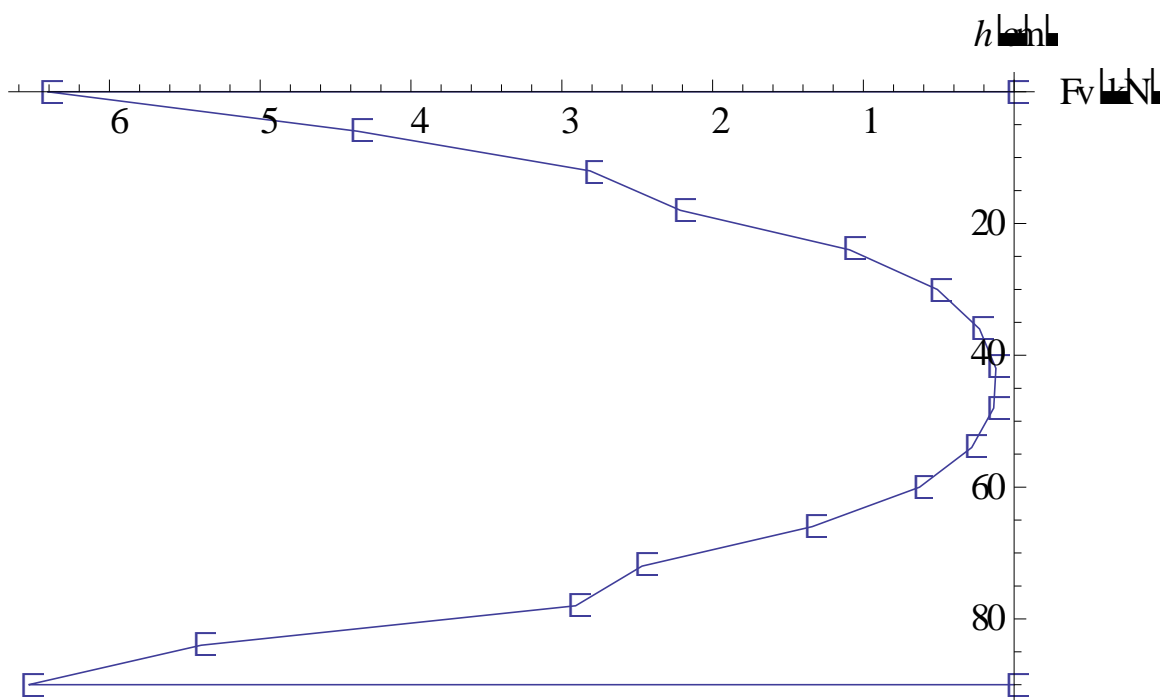
Slika 233: Misesova napetost po prerezu 16



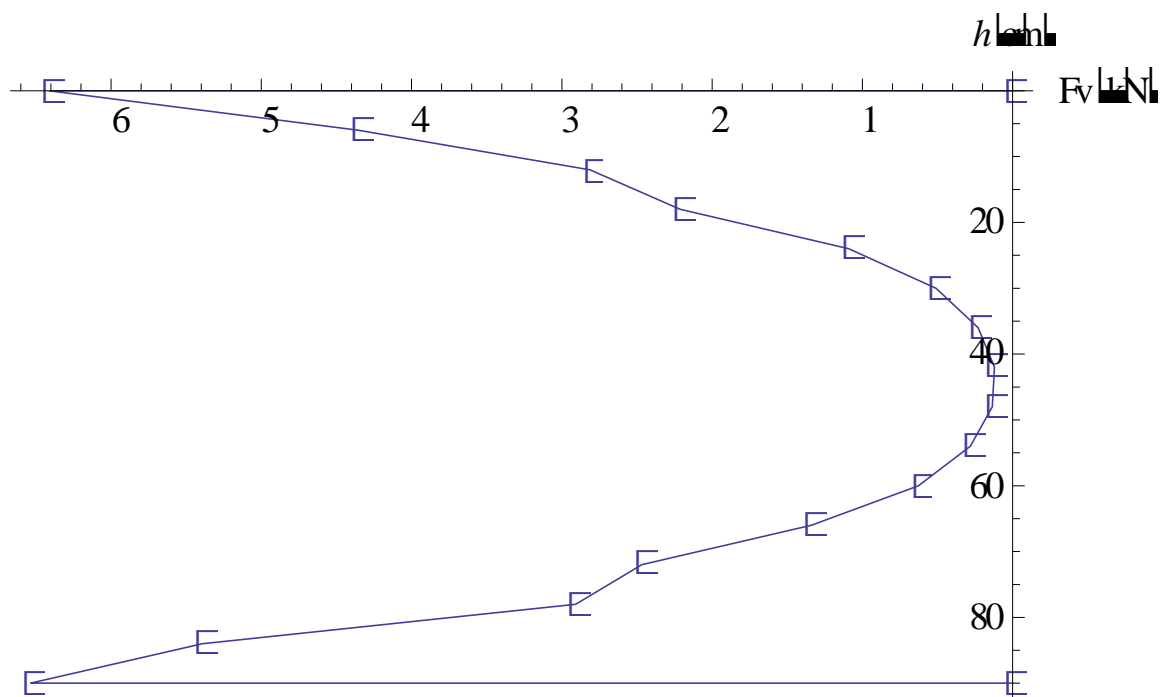
Slika 234: Misesova napetost po prerezu 17



Slika 235: Misesova napetost po prerezu 18



Slika 236: Sile v vijakih po prerezu 17



Slika 237: Sile v vijakih po prerezu 18

6.9.4 Mejne sile

Za primer 9 sem naredil še sedem variant analiz s programom AceFEM, pri katerih sem spreminjal različne parametre. Spreminjal sem gostoto mreže končnih elementov, ravninsko deformacijsko (RDS) ali ravninsko napetostno stanje (RNS) in funkcijo SmoothMesh, ki generira »boljšo« mrežo končnih elementov, ki se bolj prilega geometriji stika. Pri vseh analizah sem izpisal in primerjal mejno silo F_u (preglednica 9).

Preglednica 9: Mejne sile F_u

Varianta	Predpostavke v AceFEM-u	Mejna sila F_u [kN]
A	RDS, navadna mreža, SmoothMesh-izključen	104,57
B	RDS, gosta mreža, SmoothMesh-izključen	102,27
C	RNS, navadna mreža, SmoothMesh-izključen	74,58
D	RNS, gosta mreža, SmoothMesh-izključen	74,86
E	RDS, navadna mreža, SmoothMesh-vključen	102,64
F	RDS, gosta mreža, SmoothMesh-vključen	102,27
G	RNS, navadna mreža, SmoothMesh-vključen	75,15
H	RNS, gosta mreža, SmoothMesh-vključen	74,98
EN 1993-1-8	Merodajno: $N_{u,k}$	108,86

Pri primeru 9 merodajno porušitev predstavlja natezna porušitev po neto prerezu. Standard pri kontroli neto prereza upošteva utrjevanje materiala, saj formula vsebuje natezno trdnost f_u . Prav tako standard upošteva ugodne vplive prostorskega napetostnega stanja v okolici vijaka. Zaradi tega pride do razlike med rezultati numeričnih analiz in rezultati računa po EN 1993-1-8. Pri vseh variantah numerične analize kjer sem predpostavil ravninsko napetostno stanje, sem dobil precej manjšo mejno silo F_u , kot pri variantah z ravninskim deformacijskim stanjem. Do tega pride, ker ravninsko deformacijsko stanje določa da je deformacija $\varepsilon_{zz} = 0$ in s tem predpostavi konstanten prečni prerez pločevine, med deformiranjem v smeri delovanja obtežbe. Pri ravninskem deformacijskem stanju pride do nastanka prostorskega napetostnega stanja, ki poveča nosilnost materiala. Pri silah v vijakih pride do izrazitega vpada pri sredinskih vijakih skoraj do vrednosti nič, ker je ta stik zelo dolg. Redukcijski faktor za dolge stike β_{izr} , ki smo ga izračunali iz rezultatov numerične analize, se ne ujema s faktorjem β_{Lf} , ki ga predpisuje standard. Vzrok za to je zelo velika dolžina stika.

6.10 Poročilo numerične analize

Processor:

Pentium(R) 4 CPU 2.80 GHz, 512MB of RAM

Preglednica 10: Poročilo numerične analize za zahtevnejše primere

Primer	Varianta	Predpostavke v AceFEM-u	Št.vozlišč	Št.enačb	Čas analize[s]
5	A	RDS, navadna mreža, SmoothMesh-izključen	4591	9136	407,697
	B	RDS, gosta mreža, SmoothMesh-izključen	10991	21896	908,847
	C	RNS, navadna mreža, SmoothMesh-izključen	4591	9136	456,356
	D	RNS, gosta mreža, SmoothMesh-izključen	10991	21896	1005,18
	E	RDS, navadna mreža, SmoothMesh-vključen	4591	9136	448,345
	F	RDS, gosta mreža, SmoothMesh-vključen	10991	21896	915,847
	G	RNS, navadna mreža, SmoothMesh-vključen	4591	9136	579,644
	H	RNS, gosta mreža, SmoothMesh-vključen	10991	21896	1843,23
6	A	RDS, navadna mreža, SmoothMesh-izključen	8047	16048	567,787
	B	RDS, gosta mreža, SmoothMesh-izključen	19847	39608	985,627
	C	RNS, navadna mreža, SmoothMesh-izključen	8047	16048	763,648
	D	RNS, gosta mreža, SmoothMesh-izključen	19847	39608	1496,74
	E	RDS, navadna mreža, SmoothMesh-vključen	8047	16048	496,203
	F	RDS, gosta mreža, SmoothMesh-vključen	19847	39608	930,929
	G	RNS, navadna mreža, SmoothMesh-vključen	8047	16048	832,547
	H	RNS, gosta mreža, SmoothMesh-vključen	19847	39608	2038,74
7	A	RDS, navadna mreža, SmoothMesh-izključen	11883	23700	2306,54
	B	RDS, gosta mreža, SmoothMesh-izključen	29463	58800	2806,89
	C	RNS, navadna mreža, SmoothMesh-izključen	11883	23700	873,376
	D	RNS, gosta mreža, SmoothMesh-izključen	29463	58800	2802,4
	E	RDS, navadna mreža, SmoothMesh-vključen	11883	23700	660,33
	F	RDS, gosta mreža, SmoothMesh-vključen	29463	58800	1923,09
	G	RNS, navadna mreža, SmoothMesh-vključen	11883	23700	1054,78
	H	RNS, gosta mreža, SmoothMesh-vključen	29463	58800	3108,33
8	A	RDS, navadna mreža, SmoothMesh-izključen	14959	29872	718,664
	B	RDS, gosta mreža, SmoothMesh-izključen	37559	75032	2126,98
	C	RNS, navadna mreža, SmoothMesh-izključen	14959	29872	722,209
	D	RNS, gosta mreža, SmoothMesh-izključen	37559	75032	3262,75
	E	RDS, navadna mreža, SmoothMesh-vključen	14959	29872	669,393
	F	RDS, gosta mreža, SmoothMesh-vključen	37559	75032	2076,94
	G	RNS, navadna mreža, SmoothMesh-vključen	14959	29872	1065,51
	H	RNS, gosta mreža, SmoothMesh-vključen	37559	75032	3738,68
9	A	RDS, navadna mreža, SmoothMesh-izključen	28783	57520	16505,1
	B	RDS, gosta mreža, SmoothMesh-izključen	72983	145880	32937,8
	C	RNS, navadna mreža, SmoothMesh-izključen	28783	57520	22051,5
	D	RNS, gosta mreža, SmoothMesh-izključen	72983	145880	48321,5
	E	RDS, navadna mreža, SmoothMesh-vključen	28783	57520	16658,4
	F	RDS, gosta mreža, SmoothMesh-vključen	72983	145880	22097,8
	G	RNS, navadna mreža, SmoothMesh-vključen	28783	57520	23146,5
	H	RNS, gosta mreža, SmoothMesh-vključen	72983	145880	19417,4

7 ZAKLJUČEK

V diplomski nalogi sem določal mejno nosilnost devetih različnih primerov natezno ali strižno obremenjenih preklopnih vijachenih stikov. Primeri so izbrani tako, da je za vsak primer značilna drugačna vrsta porušitve. Za vsak primer sem najprej v skladu s standardom EN 1993-1-8 preveril računske kontrole za vijacene stike. Najmanjšo silo, ki sem jo dobil kot rezultat posameznih kontrol, sem definiral kot mejno nosilnost posameznega vijachenega stika. Za vsak primer vijachenega stika sem naredil še numerično analizo s programom AceFEM, s katero sem določil mejno nosilnost. Za vsak primer vijachenega stika sem opravil osem različnih variant analiz, pri katerih sem spreminjal različne parametre. Spreminjal sem ravninsko napetostno in ravninsko deformacijsko stanje, gostoto mreže končnih elementov, funkcijo SmoothMesh in opazoval vpliv parametrov na mejno nosilnost stika. Na koncu sem primerjal mejno nosilnost izračunano po EN-1993-1-8 z nosilnostjo izračunano iz numeričnih simulacij. Prišel sem do naslednjih ugotovitev:

V primerih kjer merodajno porušitev predstavlja strižni iztrg vijaka iz pločevine, se rezultati numeričnih analiz dobro ujemajo z rezultati kontrol po EN 1993-1-8. Standard pri računu strižnega iztrga ne upošteva utrjevanja materiala, saj formula vsebuje trdnost na meji tečenja f_y . V primerih kjer merodajno porušitev predstavlja porušitev po neto prerezu, so rezultati numeričnih analiz precej različni od rezultatov kontrol po EN 1993-1-8. Standard pri kontroli neto prereza upošteva utrjevanje materiala, saj formula vsebuje natezno trdnost f_u . Prav tako standard upošteva ugodne vplive prostorskega napetostnega stanja v okolici vijaka. Če bi v formuli za kontrolo neto prereza upoštevali napetost tečenja f_y namesto natezne trdnosti f_u , bi bili rezultati izračuna po standardu in rezultati numeričnih analiz zelo podobni.

Pri vseh variantah numerične analize kjer sem predpostavil ravninsko napetostno stanje, sem dobil manjšo mejno silo F_u , kot pri variantah z ravninskim deformacijskim stanjem. Do tega pride, ker ravninsko deformacijsko stanje določa da je deformacija $\varepsilon_{zz} = 0$ in s tem predpostavi konstanten prečni prerez pločevine, med deformiranjem v smeri delovanja obtežbe. Pri ravninskem deformacijskem stanju pride do nastanka prostorskega napetostnega stanja, ki poveča nosilnost materiala. Ravninsko napetostno stanje pa določa da je deformacija $\varepsilon_{zz} \neq 0$ in s tem upošteva kontrakcijo prečnega prereza pločevine, zaradi deformacije ε_{yy} .

V teh primerih je bil čas analize veliko daljši, kot pri ravninskem deformacijskem stanju, ker predstavlja spreminjanje deformacije ε_{zz} zapleteno funkcijo.

Gostota mreže končnih elementov ima velik vpliv na rezultate numeričnih simulacij. Pri vseh primerih, kjer sem uporabil gosto mrežo končnih elementov, sem dobil nižjo vrednost mejne nosilnosti F_u (boljši rezultat). Težava je v tem, ker zgoščanje mrež končnih elementov vodi v bistveno daljše čase analiz (preglednica 10).

Funkcija SmoothMesh ni imela bistvenega vpliva na rezultate analiz. V nekaterih primerih nam je dala rahlo nižjo mejno silo F_u , v nekaterih primerih pa malo višjo.

Pri primerih 3,4 in 5 smo dobili enakomerno razporeditev sil v vijakih. Pri primerih 6 in 7 smo že dobili deformacijo pločevine v sredini stika in padec sile v notranjih vijakih, čeprav spadata primera 6 in 7 še vedno med kratke stike. Pri primeru 8 je prišlo do pričakovane razporeditve sil v vijakih, značilne za dolge stike. Redukcijski faktor za dolge stike β_{izr} , ki smo ga izračunali iz rezultatov numerične analize, se dokaj dobro ujema s faktorjem β_{Lf} , ki ga predpisuje standard. Pri primeru 9 smo zaradi velikih deformacij pločevine dobili zmanjšanje sil v srednjih vijakih skoraj do nič. Redukcijski faktor za dolge stike β_{izr} , ki smo ga izračunali iz rezultatov numerične analize, se ne ujema s faktorjem β_{Lf} , ki ga predpisuje standard. Do tega je prišlo zaradi zelo velike dolžine stika in s tem povezanih deformacij.

V realnosti dobimo v primeru vijačenega preklopnega stika kombinacijo ravninskega napetostnega in ravninskega deformacijskega stanja. Na mestih kjer pločevine stisnejo vijaki se zaradi pritiska podložk na pločevino ustvari prostorsko deformacijsko stanje. V okolici vijakov pa se v pločevini ustvari ravninsko napetostno stanje. Takšno kombinacijo napetostnih stanj je z dvodimenzionalnim numeričnim modelom težko opisati. Če bi hoteli bolj natančno opisati realno stanje, bi morali uporabiti trodimenzionalne numerične modele, s katerimi bi še bolj realistično lahko določili mejno nosilnost vijačenih stikov.

VIRI

Beg, D. 1999. Projektiranje jeklenih konstrukcij po evropskem predstandardu ENV 1993-1-1. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 219 str.

Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij -1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe

Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij -1-8. del: Projektiranje spojev

Kržič, F. 1994. Jeklene konstrukcije 1. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 208 str.

Stanek, M., Turk, G. 1998. Osnove mehanike trdnih teles. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 263 str.