

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



DIPLOMSKA NALOGA

UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI PROGRAM PRVE STOPNJE GRADBENIŠTVO

Ljubljana, 2018

Univerza
v Ljubljani

*Fakulteta za
gradbeništvo in
geodezijo*



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

**UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM PRVE STOPNJE
GRADBENIŠTVO**

Kandidat/-ka:

Mentor/-ica:

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

Član komisije:

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	624.014.2(043.2)
Avtor:	Nick Bratina
Mentor:	doc. dr. Primož Može
Naslov:	Vpliv mejnega stanja uporabnosti na projektiranje jeklenih konstrukcij
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – univerzitetni študij
Obseg in oprema:	47 str., 9 pregl., 15 sl.
Ključne besede:	mejna stanja, jeklo, okvir, lega, globalna analiza, nacionalni dodatek, priporočila AISC, pomiki, upogibi

Izvleček:

Diplomska naloga obravnava projektiranje jeklenih konstrukcij na mejna stanja uporabnosti v skladu s standardi Evrokod. Najprej so na splošno definirana mejna stanja nosilnosti in uporabnosti, ki jih predpisuje osnovni standard. Nato je prikazana izvedba globalne analize jeklenih konstrukcij. V glavnem delu so prikazani kriteriji za kontrolo mejnih stanj uporabnosti za jeklene konstrukcije, v katerem se osredotočimo na slovenski nacionalni dodatek k osnovnem standardu in na priporočila AISC za projektiranje jeklenih konstrukcij na mejna stanja uporabnosti. Na primeru jeklenega okvirja in strešne lege je prikazano projektiranje z različnimi pristopi. Prikazano je projektiranje z upoštevanjem plastične in elastične globalne analize z upoštevanjem teorije drugega reda. Glede na izbor globalne analize so prikazane ustrezne kontrole mejnih stanj.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 624.014.2(043.2)

Author: Nick Bratina

Supervisor: Assist. prof. Primož Može, Ph.D.

Title: Serviceability design considerations for steel buildings

Document type: Graduation Thesis – University Studies

Notes: 47 p., 9 tab., 15 fig.

Key words: limit states, steel, frame, purlin, global analysis, National annex, AISC Design guide, displacements, deflections

Abstract:

This Graduation Thesis deals with the design of steel structures for the verification of serviceability limit states as imposed by Eurocode standards. Firstly, the general definitions of ultimate and serviceability limit states are shown, which are defined in the basic Eurocode standard. Next, the implementation of the global analysis of steel structures is presented. The main part lists serviceability design criteria for steel structures which are obtained from the Slovenian National Annex to standard EN 1990 and criteria from AISC Design Guide. Numerical example demonstrates the design of steel frame and steel purlin, where different design approaches are adopted. Design using the plastic and elastic global analysis considering the second order theory is presented. The appropriate verifications of the limit states are demonstrated following the selected design approach.

ZAHVALA

Za vsa navodila, razlage in podarjen čas pri nastajanju diplomskega dela se iskreno zahvaljujem mentorju doc. dr. Primožu Možetu.

Zahvaljujem se sošolcema Blažu in Aleksandru, ki sta mi skozi celoten študij pomagala in me motivirala.

KAZALO VSEBINE

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	II
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	III
ZAHVALA	IV
1 UVOD	1
2 MEJNA STANJA	2
2.1 Mejna stanja nosilnosti (MSN)	2
2.1.1 Splošno	2
2.1.2 Kontrole	2
2.2 Mejna stanja uporabnosti (MSU)	3
2.2.1 Splošno	3
2.2.2 Nepovratna MSU	4
2.2.3 Povratna MSU	4
2.3 Projektiranje na mejna stanja	5
2.3.1 Delni varnostni faktorji	5
2.3.2 Karakteristične in projektne vrednosti	6
3 ANALIZA JEKLENIH KONSTRUKCIJ	8
3.1 Vrste analiz	8
3.1.1 Elastična globalna analiza	8
3.1.2 Plastična globalna analiza	8
3.2 Vpliv teorije drugega reda	9
3.2.1 Nepopolnosti pri globalni analizi okvirjev	10
3.2.2 Kontrola stabilnosti okvirjev	11
3.3 Klasifikacija prečnih prereзов	12
3.4 Primer odziva jeklenega okvirja	13
4 KRITERIJI MSU	16
4.1 SIST EN 1990	16
4.1.1 Kontrola napetosti	16
4.1.2 Navpični in vodoravni pomiki	17
4.1.3 Nihanja	18
4.2 Slovenski nacionalni dodatek k SIST EN 1990	18
4.2.1 Omejitve	19
4.3 Priporočila AISC za projektiranje jeklenih konstrukcij na MSU [Design Guide 3]	20
4.3.1 Področja obravnave s pripadajočimi omejitvami	21

4.3.2 Sklep	24
5 PRIMER I: OKVIR	25
5.1 Zasnova.....	25
5.2 Obtežbe.....	26
5.3 Elastična globalna analiza	26
5.3.1 Mejno stanje nosilnosti (MSN).....	26
5.3.2 Karakteristična MSU	31
5.3.3 Pogosta MSU.....	33
5.4 Plastična globalna analiza (MTPČ)	33
5.4.1 Mejno stanje nosilnosti (MSN).....	33
5.4.2 Karakteristična MSU	38
5.4.3 Pogosta MSU.....	39
6 PRIMER II: LEGA	40
6.1 Zasnova.....	40
6.2 Obtežbe.....	40
6.3 Elastična globalna analiza	40
6.3.1 Mejno stanje nosilnosti (MSN).....	40
6.3.2 Karakteristična MSU	41
6.3.3 Pogosta MSU.....	42
6.4 Plastična globalna analiza (MTPČ)	42
6.4.1 Mejno stanje nosilnosti (MSN).....	42
6.4.2 Karakteristična MSU	44
6.4.3 Pogosta MSU.....	45
7 ZAKLJUČEK	46
VIRI	47

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Ciljne vrednosti verjetnosti porušitve in indeksa zanesljivosti za referenčno obdobje 50 let [4]	6
Preglednica 2: Kombinacije metod	13
Preglednica 3: Omejitve upogibov konstrukcij [2]	19
Preglednica 4: Omejitve vodoravnih pomikov konstrukcij [2]	19
Preglednica 5: Omejitve navpičnih pomikov in lastnih frekvenc stropov [2]	19
Preglednica 6: Kriteriji pomikov za predelne stene in stropove [3]	21
Preglednica 7: Kriteriji pomikov za strehe [3]	22
Preglednica 8: Kriteriji pomikov za fasade [3]	23
Preglednica 9: Ciljne vrednosti pospeškov [3]	24

KAZALO SLIK

Slika 1: Karakteristična vrednost odpornosti (a) in karakteristična vrednost obtežbe (b)	7
Slika 2: Računski materialni model v elastični globalni analizi	8
Slika 3: Računski materialni modeli za plastično analizo	9
Slika 4: Nadomestne geometrijske nepopolnosti (a) in nadomestne horizontalne sile (b)	11
Slika 5: Primer jeklenega dvonadstropnega okvirja (a) in pomik okvirja ter nastanek plastičnega porušnega mehanizma (b)	13
Slika 6: Pomik jeklenega okvirja zaradi delovanja horizontalne sile [3]	14
Slika 7: Shematski prikaz navpičnih (a) in vodoravnih pomikov (b) [4]	17
Slika 8: Primer konstrukcije	25
Slika 9: Računski model okvirja	25
Slika 10: Notranje statične količine	28
Slika 11: Merodajni porušni mehanizem	34
Slika 12: Notranje statične količine	35
Slika 13: Primerjava pomikov plastično (levo) in elastično projektiranega okvirja (desno)	39
Slika 14: Računski model lege	40
Slika 15: Porušni mehanizem za zunanje polje	42

1 UVOD

V preteklosti so prevladovala robustna konstrukcija z majhnimi razponi in velikimi prerezi elementov, katerih velika togost je preprečevala pretirane deformacije. V večini primerov je konstrukcija z dovolj veliko odpornostjo tudi dovolj toga. Z razvojem tehnologij gradnje, naprednejših metod analize v povezavi z vedno večjim poudarkom na ekonomičnosti in materialih višjih trdnosti, pa smo prišli do vitkejših konstrukcij. S pojavom vitkosti je vedno pogostejše relevantno dimenzioniranje na zahteve kot so na primer delovanje konstrukcije, udobje uporabnikov, primeren videz, zagotavljanje trajnosti konstrukcije, itd. [1]. Dandanes je potrebna kontrola primernosti obremenjene konstrukcije tako glede varnosti kot tudi glede uporabnosti. Objekti so večinoma zasnovani tako, da uporabnost ni prevladujoči kriterij. Včasih se pa temu ne da izogniti.

Slovenski nacionalni dodatek k SIST EN 1990 (ND) [2] v določenih primerih zahteva preostre kriterije, kar je posledica njegove pomanjkljive definirane. Ne podaja nekih osnov in napotnic, s katerimi bi si lahko razlagali, na kaj z določenimi omejitvami pomikov želimo doseči. V določenih primerih so zahteve primerne le za betonske konstrukcije, medtem ko so za lesene in jeklene konstrukcije te preostre. Dovoljuje, da kriterije določi investitor sam, česar pa se ti le redko poslužujejo.

V diplomski nalogi so najprej na splošno predstavljena mejna stanja in načela projektiranja na mejna stanja, kot to predstavi standard SIST EN 1990 [4]. Definirane so karakteristične vrednosti spremenljivk v kontrolah mejnih stanj. Sledijo napotki za izvedbo analize konstrukcije na osnovi računskih modelov. Na primeru jeklenega okvirja je opisano obnašanje prereza elementa in celotne konstrukcije med obremenjevanjem z različnimi nivoji obremenitev. Nato so podrobneje predstavljena mejna stanja uporabnosti. Kriteriji uporabnosti so povzeti iz slovenskega ND-ja in iz priporočil AISC [3]. Projektiranje na mejna stanja je prikazano z računskima primeroma okvirja in lege. Analiza obeh konstrukcij je izvedena po standardih Evrokod in po pripadajočih nacionalnih dodatkih. Računali smo v programu SAP 2000 in v Scii Engineer. Vsak primer je najprej dimenzioniran na mejna stanja nosilnosti, najprej z elastično, nato pa še s plastično analizo. Na vsaki tako ustrezno dimenzionirani konstrukciji se nato izvede kontrola karakterističnih in pogostih kombinacij mejnih stanj uporabnosti, ki so v nekaterih primerih odločilni.

Cilj projektiranja in izgradnje konstrukcije je, z ustrezno zanesljivostjo proti porušitvi in z zadovoljivimi stroški tekom pričakovane življenjske dobe, zagotoviti tako konstrukcijo, ki bo med gradnjo in uporabo prenašala obtežbo. V tem času mora konstrukcija delovati skladno s prvotnim namenom, za katero je bila zgrajena. Velja, da je potrebno zagotoviti konstrukcijsko odporno, uporabno in trajno konstrukcijo. Konstrukcija mora biti požarno odporna celotno zahtevano obdobje in dovolj robustna, s čimer v primeru izjemnih dogodkov preprečimo ali omejimo pretirano nesorazmerno škodo [4].

2 MEJNA STANJA

SIST EN 1990 definira mejna stanja kot tista stanja, ki jih konstrukcija doseže, tik preden ta ne izpolnjuje več zahtev, ki so podane v obravnavanih projektnih kriterijih. Vsako mejno stanje je tako povezano z določeno zahtevo po zadovoljivem odzivu (obnašanju) obremenjene konstrukcije. Mejna stanja ločimo na mejna stanja nosilnosti (MSN) in mejna stanja uporabnosti (MSU). Vsako mejno stanje je vezano na projektno stanje, ki se jih izbira glede na situacijo za katero predvidimo in projektiramo, da se bo konstrukcija nahajala. Izbrana projektna stanja morajo tako zajeti vse pričakovane pogoje, ki se lahko zgodijo med gradnjo ali uporabo konstrukcije. V MSN spadajo trajna, začasna, nezgodna in potresna projektna stanja. Pri trajnih projektnih stanjih se vključi pogoje zaradi normalne uporabe. Začasna projektna stanja so bolj kratkotrajna in ustrezajo specifičnim pogojem gradnje in popravil na konstrukciji. Nezgodna stanja so tista stanja, katerim je konstrukcija izpostavljena med delovanjem izjemnih dogodkov (požar, eksplozija, trčenje, lokalna porušitev itd.). Potresno stanje ustreza pogojem med delovanjem potresa.

2.1 Mejna stanja nosilnosti (MSN)

2.1.1 Splošno

So stanja, ki zadevajo varnost ljudi in varnost konstrukcije, v specifičnih primerih pa se nanašajo tudi na zaščito opreme znotraj konstrukcije. Nanašajo se na porušitev konstrukcije in na ostale oblike izgube nosilnosti. Glede na okoliščine je potrebna kontrola naslednjih mejnih stanj nosilnosti jeklenih konstrukcij:

- EQU: Izguba statičnega ravnotežja konstrukcije ali njenega dela kot togega telesa;
- STR: Odpoved zaradi porušitve, prevelikih premikov ali deformacij, vzpostavitev celote ali dela konstrukcije v porušeni mehanizem, zaradi preloma (pretrga), nestabilnosti celote ali dela konstrukcije (tudi podpor in temeljev) in
- FAT: Odpoved zaradi utrujenosti materiala ali drugih časovno odvisnih učinkov celote ali dela konstrukcije.

Pri skoraj vseh mejnih stanjih nosilnosti je ključen prvi doseg mejnega stanja, ki pomeni porušitev konstrukcije. V primerih, ko so odločilne velike deformacije, pa poenostavljeno lahko stanja pred porušitvijo že obravnavamo kot stanja porušitve in zato kot mejna stanja nosilnosti.

2.1.2 Kontrole

V kontroli statičnega ravnotežja je potrebno pozornost nameniti vsakršni spremembi velikosti in mestu delovanja spremenljivih vplivov. Ker se preverja le ravnotežje, togostne in trdnostne lastnosti materiala niso pomembne. Preveri se z enačbo:

$$E_{d,dst} \leq E_{d,stab}$$

Kjer je:

$E_{d,dst}$ - projektna vrednost učinkov vplivov, ki destabilizirajo in

$E_{d, stb}$ - projektna vrednost učinkov vplivov, ki stabilizirajo.

S kontrolo odpornosti se preverja odpornost na nivoju prerezov elementov in spojev (npr. nosilnost prereza, lokalno izbočenje delov prereza), odpornost elementov proti nestabilnosti (npr. uklon tlačnih palic, bočna zvrnitev upogibnih nosilcev, strižno izbočenje vitkih stojin) kot tudi formacijo konstrukcije v porušni mehanizem. Ključna je trdnost materiala. Preveri se z enačbo:

$$E_d \leq R_d$$

Kjer je:

E_d - projektna vrednost učinkov vplivov in

R_d - projektna vrednost preverjane odpornosti

2.2 Mejna stanja uporabnosti (MSU)

2.2.1 Splošno

So stanja, ki zadevajo delovanje in obnašanje konstrukcije ali njenega posameznega elementa v normalnih pogojih, udobje uporabnikov objekta in videz gradbenega objekta. Z videzom ni obravnavan samo estetski vtis objekta, ampak se s tem obravnava tudi nedopustno velike upogibe zaradi drugih razlogov.

Pod normalne pogoje mislimo okoliščine, ki jih povzročijo delovni nivoji obremenitev. Delovne obremenitve so nižje kot tiste, pri katerih preverjamo mejna stanja nosilnosti. Zaradi tega se pogosteje pojavljajo (so bolj verjetne). Željene uporabnostne zahteve se določijo z naročnikom za vsak projekt posebej in so odvisne od namembnosti objekta.

Kontrola mejnih stanj uporabnosti se izvede z uporabo kriterijev, ki se osredotočajo na nedopustne:

- Deformacije, pomike, upogibe, posedke, ki vplivajo na:
 - izgled konstrukcije;
 - poškodbe nekonstrukcijskih delov in oblog;
 - udobje uporabnikov ali
 - delovanje konstrukcije, njene vsebine in storitev.
- Nihanja (pospeški, amplitude, frekvence), ki povzročajo:
 - nelagodje pri uporabnikih;
 - omejujejo funkcionalno rabo konstrukcije ali
 - poškodbe vsebine.
- Poškodbe, ki negativno vplivajo na:
 - izgled;
 - trajnost ali
 - delovanje konstrukcije.

Za izvedbo smiselne kontrole, moramo razlikovati med povratnimi in nepovratnimi mejnimi stanji, saj je od tega odvisna izbira primernih kriterijev MSU.

2.2.2 Nepovratna MSU

Nepovratna mejna stanja so tista stanja, ki se po prenehanju ali izrazitem zmanjšanju delovanja vpliva, ki jih je povzročil, ne povrnejo v začetno stanje. To pomeni, da je odločilno prvo preseganje mejnega stanja (izraženo z mejno vrednostjo), konstrukcija pa nikoli več ne dosega zahtev MSU. Iz tega vidika so narava in posledično kriteriji nepovratnih MSU podobni kriterijem za MSN.

Preverjanje nepovratnih MSU izvedemo z uporabo karakteristične kombinacije vplivov. Kombinacija ustreza visokim nivojem obremenitev, za katere velja zelo majhna dejanska verjetnost dogodka, saj se ta v povprečju pojavi le 1 krat na 50 let [7].

Karakteristična MSU

S karakteristično MSU se preverja poškodbe nenosilne konstrukcije. Če dokažemo, da je konstrukcija pri tem nivoju vplivov v elastičnem stanju, je zagotovo tudi v nižjih nivojih. Tako se obnašanje obremenjene konstrukcije ujema s predpostavljenim računskim modelom, na katerem smo izvedli kontrolo MSU. S tem ne pride do stalnih lokalnih poškodb in nesprejemljivih pomikov nosilne konstrukcije. Preverjamo poškodbe in funkcionalnost nenosilnih elementov in zaključnih del, ki so pripeta na obravnavano nosilno konstrukcijo. Namen je, da se izognemo poškodbam zaradi drobljenja in pokanja predelnih sten, nearmiranih zidov, fasad, ometov in talnih oblog, da preprečimo ločitev stika med predelnimi stenami, tlemi ter stropom ter da omejimo deformacije okenskih in vratnih okvirjev, s čimer ne pride do zatikanja oken in vrat. Tako tudi preprečimo poškodbe strešne kritine [5]. Preverja se tudi pravilno delovanje in nepoškodovanost mostov (železniških, cestnih, pohodnih), pri katerih so MSU (deformacije in nihanja) odločilna za prometno varnost [6].

Kontrolo karakteristične MSU se lahko izvede v obliki omejitev napetosti ali pomikov. Omejitev napetosti je običajno vezana na napetost tečenja jekla. Pri omejitvi pomikov pa je potrebno definirati pogoje podanih kriterijev.

2.2.3 Povratna MSU

Povratna mejna stanja so tista stanja, ki se po prenehanju ali izrazitem zmanjšanju delovanja vpliva, ki jih je povzročil, povrnejo v začetno stanje. To pomeni, da prvi prehod v mejno stanje še ne pomeni tudi stalne neustreznosti glede kriterijev MSU. Sem spadajo trenutni pretirani pomiki in nihanja konstrukcije.

Preverjanje povratnih MSU izvedemo z uporabo ene izmed dveh kombinacij vplivov. Pogosto kombinacijo uporabimo takrat, ko preverjamo mejna stanja, katerim dovolimo določeno trajanje in verjetnost preseganja pripadajočih mejnih vrednosti. Navidežno stalno pa takrat, ko nas zanimajo mejna stanja, za katere dopuščamo določeno dolgoročno preseganje mejnih vrednosti. Ta kombinacija je presežena približno polovico opazovanega časa [7]. Z njima vedno opazujemo elastično obnašanje konstrukcije.

Pogosta MSU

S kontrolo pogostih MSU se preverja delovanje strojev in opreme, ki so zaradi zahteve po pravilnem in natančnem delovanju, zelo občutljivi na deformacije in nihanja konstrukcij, v katerih se nahajajo. Mednje spadajo vse vrste dvigal, žerjavnih prog, velikih drsnih vrat, specializiranih naprav (zdravstvena in znanstvena oprema v laboratorijih), občutljivo pohištvo itd. Z zagotavljanjem njihovega predvidenega delovanja, omogočimo neoviran potek storitev in del v obravnavani stavbi. S pogosto MSU se preverja tudi ugodje (fiziološko in psihološko) uporabnikov na vseh površinah objektov, na katerih se nahajajo, ki bi lahko zaradi delovanja vetra, potresa ali izvajanja različnih predvidenih premikanj ljudi (ples, hoja, skakanje) pretirano nihala. Preverja se predvsem pohodne mostove, visoke in vitke stavbe ter plesne dvorane [5]. Pri strehah z majhnim naklonom preverjamo odvodnjavanje vode, s čimer na strešnih površinah preprečimo probleme zaradi njenega zastajanja [2].

Navidezno stalna MSU

Kontrole navidezno stalnih MSU se opravi, ko so pomembni vplivi dolgotrajne obtežbe in ko preverjamo videz deformirane konstrukcije [4]. Vplivi dolgotrajne obtežbe so relevantni pri prednapetih in sovprežnih elementih, zaradi pojava relaksacije jekla ter lezenja, krčenja in razpokanja betona.

2.3 Projektiranje na mejna stanja

Projektiranje na mejna stanja po SIST EN 1990 se izvede na osnovi računskih modelov za konstrukcije in obtežbe, ki so skladna s preverjanimi mejnimi stanji. To se izvede tako, da v modelih upoštevamo ustrezne projektne vrednosti vplivov, lastnosti materiala ali proizvodov in geometrije konstrukcije. Preverimo, če je pri tem katero mejno stanje preseženo. Projektne vrednosti določimo z uporabo metode delnih faktorjev. Preverjamo za vsa smiselna projektna stanja in z obtežno ovojnico, ki se jo izlušči iz nabora vseh možnih obtežnih primerov, določenih z ustreznimi kombinacijami vplivov. Obtežbe, ki se fizikalno ne morejo pojaviti istočasno, se v obtežnih kombinacijah ne upoštevajo skupaj. V kontrolo je potrebno vključiti možne deformacije in nepopolnosti, ki se upoštevajo sočasno z vplivi, za katere upoštevamo možnost odstopanja od predpostavljenih smeri in mest delovanja.

2.3.1 Delni varnostni faktorji

Zaradi velikega raztrosa statističnih podatkov vedno obstaja možnost, da pride pri neugodni kombinaciji obtežb in odpornosti do preseganja mejnih stanj. Cilj je projektiranje konstrukcije, ki tekom njene življenjske dobe še dopušča določeno (a majhno) verjetnost preseganja mejnih stanj. Nasprotno je konstrukcija s prenizko verjetnostjo porušitve neprimerna zaradi neekonomičnosti. V preglednici 1 je prikazana primerjava zahtevane zanesljivosti konstrukcije za pogoj varnosti proti porušitvi in za pogoj uporabnosti (za stavbe normalne pomembnosti). Varnost zajamemo z vrednostjo verjetnosti porušitve p_f in indeksom zanesljivosti β_c , ki sta med seboj tesno povezana.

Preglednica 1: Ciljne vrednosti verjetnosti porušitve in indeksa zanesljivosti za referenčno obdobje 50 let [4]

RAZRED VARNOSTI	Mejno stanje nosilnosti		Mejno stanje uporabnosti	
	p_f	β_c	p_f	β_c
Običajna	$7.0 \cdot 10^{-5}$	3.8	$7.0 \cdot 10^{-2}$	1.5

Ključna razlika med mejnim stanjem uporabnosti in mejnim stanjem nosilnosti je posledica njune prekoračitve. Medtem ko prekoračitev MSN skoraj vedno pomeni porušitev konstrukcije, prekoračitev MSU praviloma ne ogrozi varnosti konstrukcije in ljudi. Konstrukcijo lahko po odstranitvi vplivov, ki so povzročili prekoračitev mejnega stanja uporabnosti, varno uporabljamo. Zaradi takih življenjsko nenevarnih situacij, dopuščamo projektiranje konstrukcij z nižjimi nivoji zanesljivosti, ki imajo precej višjo verjetnost preseganj mejnih stanj uporabnosti.

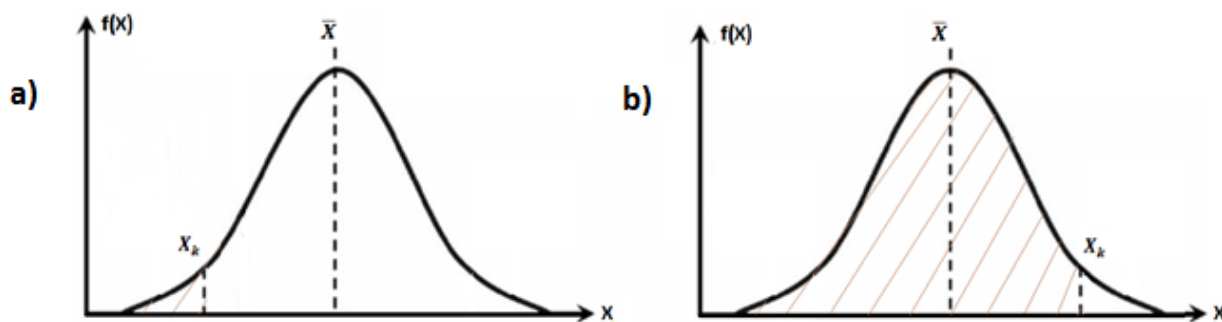
SIST EN1990 dopušča, da se enega od mejnih stanj opusti, če je na voljo dovolj podatkov, da zadostitev zahtev enega mejnega stanja pomeni zadostitev tudi drugega. Tako lahko na primer v primeru nosilcev, dimenzioniranih na MSN, samo z omejitvijo razmerja med višino in razponom, zagotovimo togost, s katero direktno izpolnimo tudi zahteve MSU za upogib.

Delni varnostni faktorji za vplive in materiale so določeni na osnovi zahtevane zanesljivosti konstrukcije. Bolj spremenljivim količinam pripišemo večje varnostne faktorje in obratno [9]. Delni varnostni faktor za vpliv γ_F vključuje negotovost reprezentativnih vrednosti vplivov in negotovost modelov za vplive in učinke vplivov. Delni varnostni faktor za material γ_M upošteva negotovost modelov odpornosti konstrukcije in negotovost lastnosti materialov. Faktorji so podani v nacionalnih dodatkih, Evrokod ponuja le priporočene vrednosti.

2.3.2 Karakteristične in projektne vrednosti

Projektno vrednost vpliva dobimo s povečavo karakteristične vrednosti vpliva z varnostnim faktorjem za vpliv. Projektno odpornost dobimo z zmanjšanjem nominalne (karakteristične) vrednosti meje tečenja jekla z varnostnim faktorjem za material, ki je odvisen od vrste preverjane odpornosti.

Karakteristične vrednosti vplivov in lastnosti materialov ter produktov, ki se jih uporabi v kontrolah mejnih stanj, se dobi iz statistične porazdelitve rezultatov merjene spremenljivke (frekvenca pojavljanja vrednosti $f(x)$ neke spremenljivke x). Karakteristična vrednost ustreza predpisani verjetnosti, da spremenljivka s svojimi neugodnimi vrednostmi v referenčnem obdobju ne bo presežena. Karakteristična vrednost za odpornost (nosilnost) je določena pri 5-odstotni fraktili (slika 1.a), kar pomeni, da bo v 5% manjša od svoje karakteristične vrednosti. Karakteristična vrednost za obtežbe je določena s 95-odstotno fraktilo (slika 1.b), kar pomeni, da bo v 95% primerih manjša od svoje karakteristične vrednosti.



Slika 1: Karakteristična vrednost odpornosti (a) in karakteristična vrednost obtežbe (b)

Karakteristična vrednost stalnega vpliva G_k je v primeru, ko sta spreminjanje vpliva tekom projektne življenjske dobe in njegov koeficient variacije majhna, enaka srednji vrednosti statistične porazdelitve (na sliki je označena z $\bar{X}$). Če je konstrukcija občutljiva na spremembo stalnega vpliva, se neugodno delovanje stalnega vpliva predstavi z vrednostjo $G_{k,sup}$, ugodno delovanje pa z $G_{k,inf}$. Lastna teža konstrukcije se lahko izračuna iz nazivnih mer in srednje gostote.

Karakteristične vrednosti za koristno obtežbo so zaradi pomankanja statističnih podatkov določene z nazivnimi vrednostmi in so različne glede na namembnost površin v objektih. Karakteristična vrednost za vremenske vplive (veter, sneg) in koristne obtežbe tal se določi pri 2-odstotni fraktili statistične porazdelitve letnih ekstremov pri referenčnem obdobju enega leta. Prevedeno na srednjo povratno dobo se taka obtežba v povprečju pojavi enkrat na vsakih 50 let [4].

3 ANALIZA JEKLENIH KONSTRUKCIJ

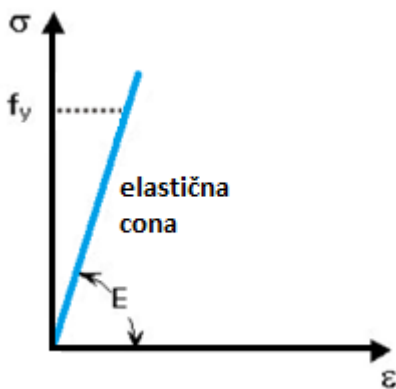
3.1 Vrste analiz

Jeklene konstrukcije lahko analiziramo z [5]:

- elastično globalno analizo po teoriji prvega ali teoriji drugega reda ali pa
- z eno od metod plastične globalne analize, odvisno od predpostavljenih računskih modelov za jeklo (moment-rotacija ali napetost-deformacija):
 - elastično-plastično analizo po teoriji prvega ali drugega reda,
 - elastično-idealno plastično analizo po teoriji prvega ali drugega reda,
 - metodo togih plastičnih členkov po teoriji prvega reda.

3.1.1 Elastična globalna analiza

Globalna analiza temelji na linearni zvezi med napetostjo in deformacijo materiala, ne glede na nivo napetosti. Obnašanje celotne konstrukcije je elastično in je neodvisno od višine obtežbe, kar je prikazano na sliki 2.

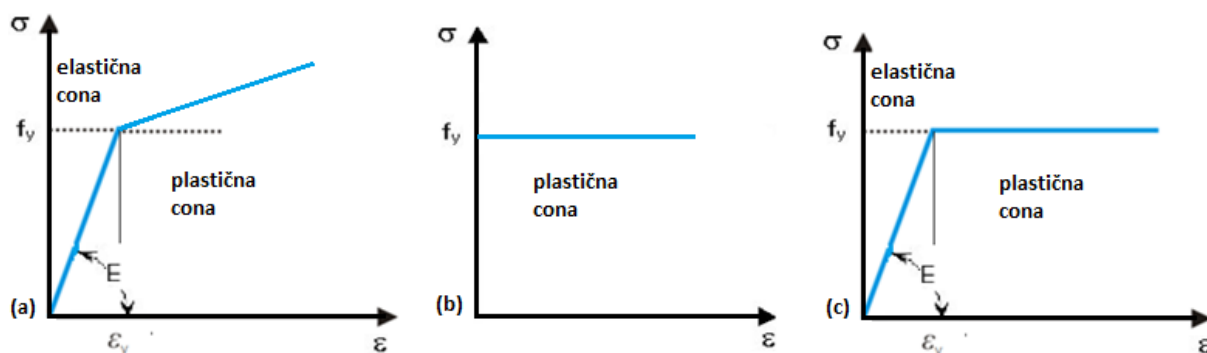


Slika 2: Računski materialni model v elastični globalni analizi

V primeru, ko smemo zanemariti vplive deformacij, lahko linearno elastično zvezo prenesemo na nivo cele konstrukcije in uporabimo princip superpozicije, ki olajša računanje notranjih količin. Elastično globalno analizo lahko uporabimo v vseh primerih (velja za vse razrede prečnih prereзов). Vedno se uporablja za kontrole mejnih stanj uporabnosti (ko je odločilen kriterij povezan z nihanji in pomiki).

3.1.2 Plastična globalna analiza

Plastična analiza upošteva tečenje jekla. Jeklo se po dosegu meje tečenja f_y ne obnaša več linearno elastično, temveč se plastično deformira. Različni računski materialni modeli za uporabo v plastični analizi so zbrani na sliki 3:



Slika 3: Računski materialni modeli za plastično analizo

Na sliki 3(a) je idealno elasto-plastični model jekla z utrditvijo, na sliki 3(c) pa idealno elasto-plastični model brez utrditve. Oba modela upoštevata linearno elastično deformiranje do dosežene meje tečenja, razlikujeta pa se pri opisu nadaljnjega plastičnega deformiranja. Utrjevanje jekla je pomembno, ko opazujemo lokalni razvoj plastifikacije, pomaga pa tudi pri konvergenci analize. Slika 3(b) predstavlja idealno plastični model. Uporabimo ga, ko plastično analizo izvedemo po metodi togih plastičnih členkov (zanemarimo elastično deformiranje) [10].

Plastična globalna analiza upošteva prerazporeditev napetosti po prerezu, kar omogoči nastanek plastičnih členkov vse do vzpostavitve plastičnega porušnega mehanizma. V točki 3.4 je podrobneje opisano takšno plastično obnašanje. Plastično globalno analizo lahko izvedemo, če so za elemente, v katerih se razvijejo plastični členki, izpolnjeni sledeči pogoji:

- jeklo mora biti duktilno, kateremu pogoju običajno konstrukcijsko mehko jeklo tudi ustreza,
- lokalna nestabilnost je preprečena z izbiro prerezov v 1. razredu kompaktnosti (glej točko 3.3) in
- z bočnimi podporami na mestu plastičnih členkov je zagotovljena stabilnost na nivoju elementa (ni pojava bočne zvrnitve).

S plastično globalno analizo lahko ugotovimo dejansko porušno obtežbo, ki poruši konstrukcijo. Zaradi tega se analiza uporablja v kontrolah mejnih stanj nosilnosti [8].

3.2 Vpliv teorije drugega reda

Vplive geometrijske nelinearnosti se upošteva v preverjanju mejnih stanj, če deformacije konstrukcije povečajo učinek vplivov ali pomembno določajo obnašanje konstrukcije. Teorija drugega reda (TDR) se lahko v globalni analizi upošteva vedno in brez omejitev. Teorija prvega reda (TPR) ne upošteva vpliva deformacij in pomikov na konstrukcijo, saj so ti tako majhni, da ne spremenijo njene geometrije in posledično tudi ne notranjih količin ali njenega obnašanja. TPR je izpeljana na enačbah začetne nedeformirane geometrije konstrukcije in se lahko uporablja takrat, ko je izpolnjen spodnji kriterij [8] glede mejnega obtežnega faktorja α_{cr} . Ta nam pove, za koliko še lahko pomnožimo projektno obtežbo, da dosežemo elastično kritično obtežbo.

- $\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10$, za elastično analizo
- $\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 15$, za plastično analizo

Kjer je:

F_{Ed} - projektna obtežba in

F_{cr} - elastična kritična uklonska obtežba pri pojavu globalne nestabilnosti pri začetni elastični togosti.

Pri portalnih okvirjih s položnimi nakloni streh ($< 26^\circ$) in pri okvirnih konstrukcijah (steber-prečka) se TPR uporablja, če je zgornji kriterij izpolnjen za vsako etažo. Če je osna sila v prečki majhna, se za izračun kritičnega uklonskega koeficienta pri takih konstrukcijah lahko uporabi enačba:

$$\alpha_{cr} = \left(\frac{H_{Ed}}{V_{Ed}} \right) \cdot \left(\frac{h}{\delta_{H,Ed}} \right)$$

Kjer je:

H_{Ed} - celotna projektna horizontalna obtežba; vključno z ekvivalentno silo, delujoča na etažo;

V_{Ed} - celotna projektna vertikalna obtežba okvirja, ki se prenaša na etažo;

$\delta_{H,Ed}$ - relativni vodoravni pomik etaže, ko je okvir obtežen z vso projektno horizontalno obtežbo in

h - višina etaže.

3.2.1 Nepopolnosti pri globalni analizi okvirjev

V globalni analizi konstrukcij je zahtevano upoštevati učinke nepopolnosti. Te izhajajo iz geometrijskih nepopolnosti kot so neravnost elementov, odkloni od vertikalnosti, netočno naleganje v spojih itd. in zaradi zaostalih napetosti, ki so posledica varjenja in ostalih postopkov obdelave. SIST EN 1993 določa, da se globalne nepopolnosti vključi v analizo v obliki nadomestnih globalnih nepopolnosti in nepopolnosti pri globalni analizi povezij. Lokalne nepopolnosti elementov (z uklonskimi krivuljami in amplitudami ali pa z nadomestnimi horizontalnimi silami) se v analizo vključi neposredno, če sta za vsak tlačni element izpolnjena pogoja:

- element je vsaj na enem koncu pritrjen z momentnim spojem in
- presežena je relativna vitkost tlačnega elementa, podana z omejitvijo (pomen simbolov isti kot v enačbi za izračun mejnega obtežnega faktorja):

$$\bar{\lambda} > 0.5 \cdot \sqrt{\frac{A f_y}{N_{Ed}}}$$

V večini primerov drugi pogoj ni presežen, zato lokalnih nepopolnosti ni potrebno upoštevati v globalni analizi. Takrat se učinke lokalnih nepopolnosti posameznih elementov zaobjame v kontrolah stabilnosti na nivoju posameznega elementa v obliki uklonskih krivulj.

Nadomestne globalne nepopolnosti

Predstavi se jih lahko z nadomestnimi geometrijskimi nepopolnostmi kot deformirano obliko okvirja (horizontalni zamik - ϕ) ali pa se globalni zamik okvirja pretvori v sistem nadomestnih horizontalnih sil. Izračun zamika se opravi po spodnjih izrazih in je, skupaj z metodo nadomestnih horizontalnih sil, prikazan na sliki 4.

$$\phi = \phi_0 \cdot \alpha_h \cdot \alpha_m ; \phi_0 = 1/200$$

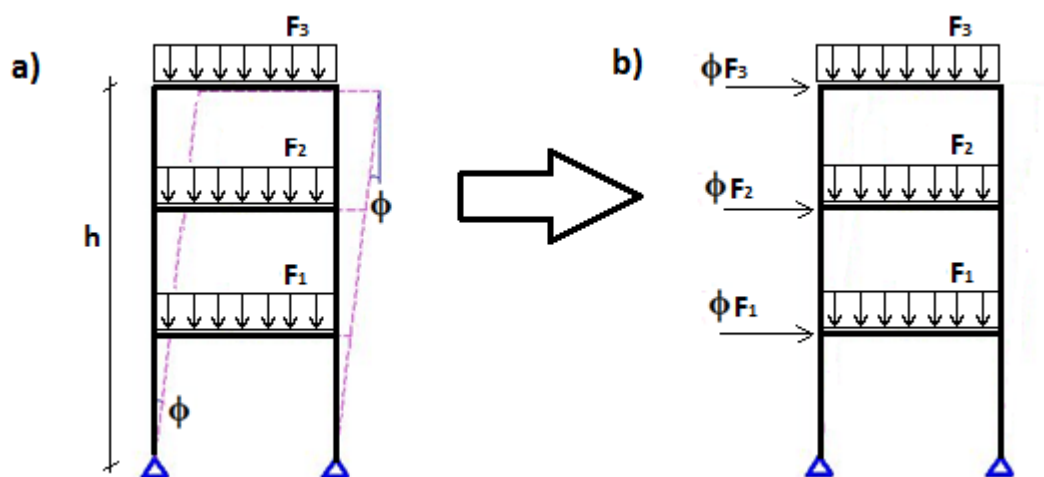
$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}}, \text{ vendar } \frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1$$

$$\alpha_m = \sqrt{0.5 \left(1 + \frac{1}{m}\right)}$$

Kjer je:

m - število stebrov v obravnavani ravnini okvirja (tisti, ki nosijo vsaj 50% povprečne navpične obtežbe stebrov v tej ravnini)

h - višina okvirja [m]



Slika 4: Nadomestne geometrijske nepopolnosti (a) in nadomestne horizontalne sile (b)

3.2.2 Kontrola stabilnosti okvirjev

SIST EN 1993-1-1 dovoljuje uporabo dveh metod kontrol stabilnosti in dimenzioniranja okvirjev:

- V primeru, ko se opravlja globalna analiza okvirja po TDR in so vanjo neposredno vključene globalne nepopolnosti okvirja ter lokalne nepopolnosti elementov, ni potrebe po kontroli stabilnosti na nivoju posameznega elementa. Izvede se le kontrola nosilnosti prečnih prereзов.
- Če se v globalno analizo okvirja vključi le vplive TDR in globalne nepopolnosti okvirja, pa se preverbo lokalnega obnašanja elementov z vključenimi lokalnimi nepopolnostmi opravi v

kontrolah stabilnosti na nivoju posameznih elementov. Taka kontrola vključuje notranje količine dobljene iz analize na ravni okvirja, za uklonsko dolžino elementov pa upoštevamo njihove sistemske dolžine ($l_u = l_{sist}$).

Enoetažnim okvirjem lahko učinke TDR določimo s povečanjem tistih notranjih statičnih veličin, ki so posledica horizontalnih obtežb H_{Ed} (zunanje obtežbe, nadomestne horizontalne sile zaradi nepopolnosti), prvotno izračunanih po analizi prvega reda. To lahko naredimo v primeru, ko je $\alpha_{cr} \geq 3$. Povečevalni faktor izračunamo kot:

$$k_{\delta} = \frac{1}{1 - \frac{1}{\alpha_{cr}}}$$

Metoda je dovoljena tudi pri več etažnih okvirjih, če imajo vse etaže podobno razporeditev vertikalnih in horizontalnih obtežb ter razporeditve togosti okvirja v odvisnosti od relativnih strižnih sil. Če je $\alpha_{cr} < 3$ se analiza po TDR opravi z računalniškimi programi, ki to tudi omogočajo.

3.3 Klasifikacija prečnih prerezov

Prečni prerezi so glede razpoložljive momentne in rotacijske kapacitete razdeljeni v štiri kompaktnostne razrede:

- pri vitkih prerezih (4.razred) meja tečenja v najbolj obremenjenem vlaknu ni dosežena, ker pločevina prej lokalno izboči,
- pri semikompaktnih prerezih (3. razred) se plastični členek ne more razviti, ker se pločevina po tečenju robnega vlakna lokalno izboči,
- kompaktni prerezi (2. razred) omogočijo konstrukciji razvoj prvega plastičnega členka, vendar lokalno izbočenje v plastičnem območju prepreči nadaljnji razvoj plastičnih členkov in
- plastični prerezi (1. razred), ki lahko razvijejo plastični členek in zaradi velike rotacijske kapacitete omogočijo razvoj nadaljnjih plastičnih členkov in s tem prerazporeditev momentov.

Klasifikacija posameznih razredov prerezov je odvisna od razmerja med širino in debelino posameznih tlačnih delov prečnih prerezov. Tlačeni deli so vsi tisti deli pločevin, ki so zaradi obravnavane obtežne kombinacije popolnoma ali pa samo delno v tlaku (osne sile ali upogibni momenti). Tako je razred, v katerega spada določen prerez, odvisen tudi od načina obremenitve in določen z najvišjim razredom kompaktnosti izmed njegovih posameznih delov.

Iz tega sledi, da je izbira globalne analize (izračun notranjih statičnih količin) in kontrole upogibne nosilnosti prereza odvisna od razredov kompaktnosti prečnih prerezov elementov konstrukcije (pomembni predvsem prerezi elementov v katerih se razvijejo plastični členki). Možne kombinacije v odvisnosti od razreda kompaktnosti prereza [11] so prikazane v preglednici 2.

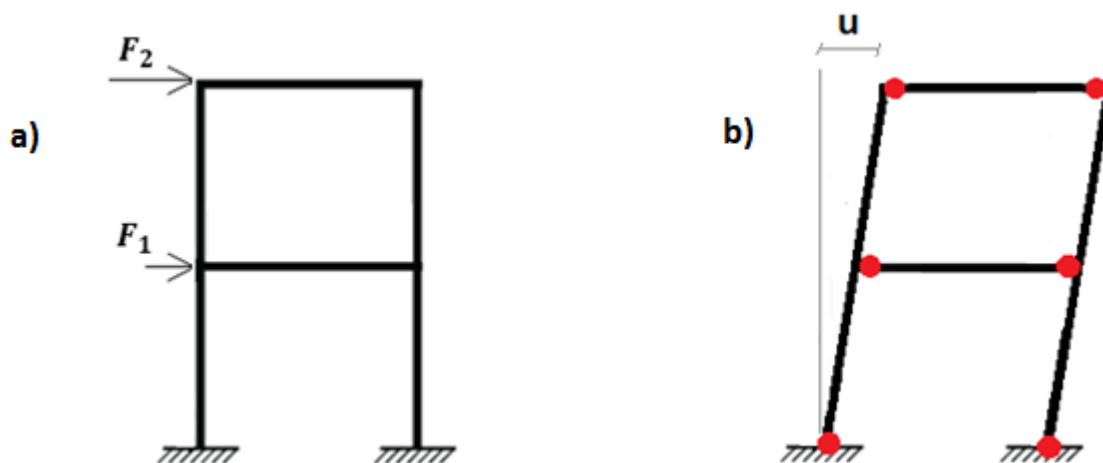
Preglednica 2: Kombinacije metod

RAZRED KOMPAKTNOSTI	Vrsta globalne analize	Upogibna nosilnost prereza
1. razred	plastična	plastična
2. razred	elastična	plastična
3. razred	elastična	plastična
4. razred	elastična	sodelujoča širina

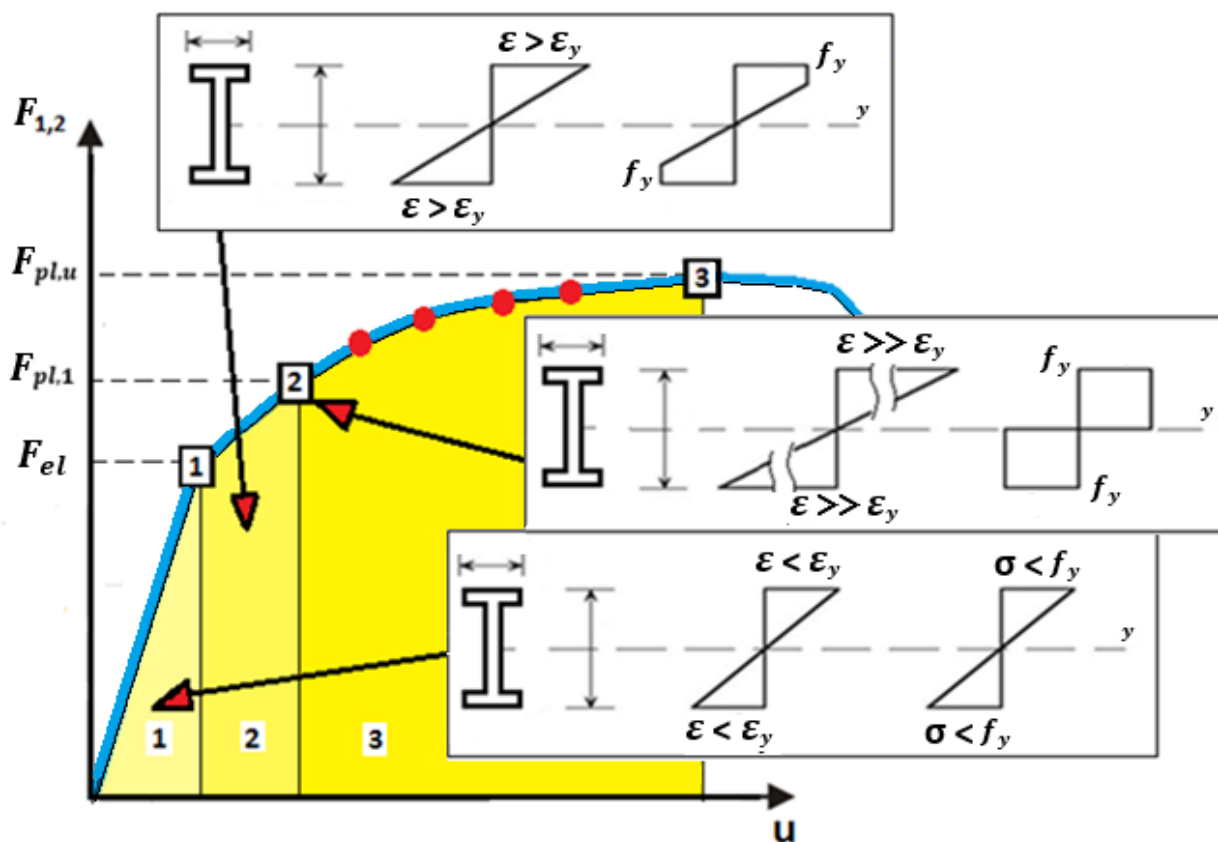
3.4 Primer odziva jeklenega okvirja

Na dvoetažni okvir (slika 5.a) delujeta horizontalni sili F_1 in F_2 . Elementi okvirja so iz I-profila iz duktilnega konstrukcijskega jekla. Jeklo predstavimo z idealno elasto-plastičnim materialnim modelom (slika 3.c). Prerezi so v 1. razredu kompaktnosti. Konstrukcija je bočno podprta, s čimer zagotovimo stabilnost konstrukcije.

S temi izpolnjenimi pogoji lahko računsko izkoristimo veliko plastično odpornostno rezervo, ki so jo jekleni okvirji sposobni izkazati. Takšna rezerva (dodatna odpornost) konstrukcije predstavlja razliko med obtežbo, ki povzroči začetek plastifikacije krajnega vlakna prereza in obtežbo, ki razvije porušni mehanizem konstrukcije. Plastično rezervo izračunamo s plastično analizo.



Slika 5: Primer jeklenega dvonadstropnega okvirja (a) in pomik okvirja ter nastanek plastičnega porušnega mehanizma (b)



Slika 6: Pomik jeklenega okvirja zaradi delovanja horizontalne sile [3]

Obnašanje okvirja pojasnimo na dobljenem grafu odvisnosti sile in pomika [11] vrhnje etaže okvirja prikazanemu na sliki 6. Za lažji prikaz razvoja napetostno-deformacijskega stanja v prerezu [10] vpliv osnih in prečnih sil zanemarimo.

Elastična cona (območje 1)

Predstavlja območje, v katerem je konstrukcija popolnoma elastična. To pa zato, ker upogibni moment povsod po konstrukciji povzroča napetosti manjše od meje tečenja. Z obremenjevanjem se napetost in deformacija linearno povečujeta po globini prereza elementov konstrukcije. V tem območju je togost konstrukcije zaradi neizkoriščenosti (elastičnosti) vlaken največja. To območje je v projektiranju na mejna stanja uporabnosti najpomembnejše. Zaradi elastičnosti konstrukcije je vsaka deformacija zmožna povratka v predobremenjeno stanje, zato v tem območju preverjamo povratna MSU.

Meja tečenja prereza (kvadrat 1)

Ko je konstrukcija obremenjena s silo F_{el} , je upogibni moment v najbolj obremenjenem prerezu dovolj velik, da robno vlakno doseže napetost tečenja f_y . Moment, ki povzroči tako plastifikacijo prvega vlakna imenujemo elastična upogibna nosilnost prereza $M_{el,Rd}$. Od tukaj je pomik konstrukcije nepovraten. To napetostno stanje predstavlja zgornjo mejo za kontrolo nepovratnih MSU (karakterističnih MSU).

Nastanek 1. plastičnega členka (območje 2)

Z nadaljnjim povečevanjem sile se v najbolj obremenjenem prerezu upogibni moment poveča prek elastičnega odpornostnega momenta. Ukrivljenost in s tem deformacija prereza se večata, napetost pa ostane konstantna na meji tečenja. Plastifikacija vlaken se pomika vedno globlje proti težišču prereza. Zaradi vedno manjšega deleža elastičnih vlaken se rotacija prereza povečuje hitreje kot moment; prerez izgublja na togosti. Posledično od tega stanja naprej konstrukcija vedno hitreje izgublja na togosti-prirast pomika je vedno večji glede na prirast obremenitve.

Popolna plastifikacija prereza (kvadrat 2)

Ko obremenjujemo s silo $F_{pl,1}$, se upogibni moment poveča do te meje, da vsa vlakna v prerezu plastificirajo. Takrat prerez doseže plastično upogibno nosilnost. Za doseg tega momenta sicer potrebujemo neskončno deformacijo prereza, vendar je taka poenostavitev zaradi utrjevanja jekla možna. Nadaljnje povečevanje upogibnega momenta povzroči le povečanje rotacije prereza. V prerezu se je tako razvil plastični členek, pri katerem prerez prosto rotira pri konstantnem momentu. Razvoj plastičnega členka predstavlja za ta prerez mejo nosilnosti. Tega se poslužujemo pri kontrolah plastične upogibne nosilnosti na nivoju prereza, čemur rečemo plastično dimenzioniranje prečnih prerezov.

Formacija plastičnih členkov po konstrukciji (območje 3)

S povečevanjem obremenitve se v sledečih najbolj obremenjenih prerezih, zaradi prerazporejanja napetosti po elementu, po konstrukciji razvijajo nadaljnji plastični členki (rdeče pike na sliki).

Plastični porušni mehanizem konstrukcije (kvadrat 3)

Ko se na konstrukciji za vsako stopnjo nedoločenosti razvije plastični členek, postane konstrukcija pri sili, ki povzroči dodaten plastični členek, statično labilna (slika 5.b). Tak mehanizem imenujemo plastični porušni mehanizem, silo, ki ga povzroči, pa mejna porušna sila $F_{pl,u}$. Ta predstavlja mejno stanje nosilnosti dobljeno z uporabo plastične globalne analize.

4 KRITERIJI MSU

Osnovni standard SIST EN 1990 ne podaja številčnih kriterijev za kontrolo MSU (mejne vrednosti), ampak le napotuje projektanta k skupnem dogovoru z naročnikom glede izbire potrebnih kriterijev. Te je potrebno za vsak projekt vedno znova določiti. Kriterije MSU je potrebno sestaviti:

- skladno z namembnostjo konstrukcije;
- z ozirom na vsebino v smislu naprav, strojev in nekonstrukcijskih elementov;
- v zvezi z zahtevami glede uporabnosti, vzajemno dogovorjenimi v odnosu projektant-uporabnik;
- neodvisno od materiala nosilne konstrukcije.

Jeklene in lesene konstrukcije dopuščajo mnogo večje pomike brez pojava poškodb kot pa betonske konstrukcije. S tem je definiranje primernih kriterijev zelo zapleteno, zato se sistemiziranosti kriterijev uporabnosti tehnični standardi na široko ogibajo [5].

Mejna stanja uporabnosti so povezana s togostjo in ne toliko z nosilnostjo, zato večina kriterijev MSU teži k zagotovitvi minimalnih togostnih karakteristik elementa in celotne konstrukcije. Kriteriji uporabnosti za stavbe so povezani s togostjo stropov in streh, z višinskimi razlikami na stikih stropov, z nagibi etaž in cele stavbe itd. Taki kriteriji so definirani z omejitvijo velikosti upogibov (kot absolutna vrednost ali delež razpetine) in lastnih frekvenc nihanj. Kriteriji za nagib so definirani z omejitvami vodoravnih pomikov. Mnogokrat se preverja še kriterije, ki omejujejo napetosti v nosilnih elementih.

Z uporabo kriterijev je mejno stanje nosilnosti točno določeno. Glede mejnih stanj uporabnosti take ostre meje ni. Zahteve glede MSU lahko le posredno preverimo s kontrolo kriterijev. Tako, na primer, računsko določen pomik zaradi predpostavljenih računskih, materialnih in obtežnih modelov, ne bo nujno enak dejanskemu povesu. Prav tako pa stavba, ki ustreza kriteriju pomika, še ni nujno ustrezna, če pa ga presega, ni nujno neustrezna glede obravnavane zahteve. To pa zato, ker hočemo kompleksno zahtevo preveriti z enostavnim kriterijem, ki spremlja le eno vektorsko količino. S kriteriji uporabnosti želimo tako zagotoviti neko objektivno merilo, s katero razvrščamo konstrukcije po ustreznosti [5].

4.1 SIST EN 1990

4.1.1 Kontrola napetosti

Pri stavbah, SIST EN 1990 kot tudi SIST EN 1993-1-1 določata, da je v primeru, ko je konstrukcija projektirana na MSN s plastično analizo, potrebna kontrola napetosti na nivoju karakteristične MSU. Tako zagotovimo elastično obnašanje (brez pojava poškodb) nosilne konstrukcije. Dimenzioniranje prerezov izvedemo tako, da se meji tečenja krajnega vlakna v prerezu na nivoju karakteristične MSU izognemo. Kontrola napetosti se opravi po izrazu:

$$\sigma_{Ed,ser} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

Kjer je:

$\sigma_{Ed,ser}$ - napetost v prerezu zaradi karakteristične kombinacije vplivov po MSU;

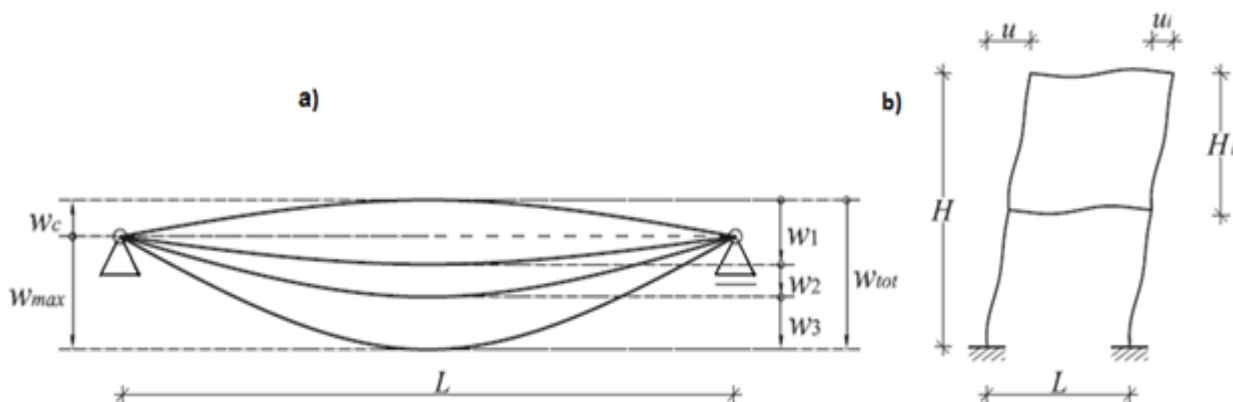
f_y - napetost na meji tečenja.

Pri mostovih SIST EN 1993-2 poleg kontrole vzdolžnih napetosti na nivoju karakteristične MSU določa še omejitve strižnih napetosti, kontrolo Missesovega pogoja tečenja idr.

4.1.2 Navpični in vodoravni pomiki

S pomiki konstrukcije lahko preverjamo poškodbe pripetih nenosilnih elementov ter delovanje podprtih naprav. Z računom pomikov se izvede kontrola videza konstrukcije in zastajanja vode na ravnih strehah. Tako lahko zagotovimo potrebno togost konstrukcije za zadostitev mejnih stanj nihanj. Delovanje mostov se preveri s kontrolami deformacij voziščne konstrukcije, vmesnih nosilnih ležišč ter dilatacij. Pri železniških mostovih se izognemo pretiranim spremembam v vertikalni in horizontalni geometriji poteka tirov.

V dodatku A k SIST EN 1990 sta podani splošni definiciji horizontalnih in vertikalnih pomikov, ki jih upoštevamo v kriterijih MSU in ki veljata za konstrukcije iz vseh materialov. Shematski prikaz navpičnih pomikov nosilca in vodoravnih pomikov konstrukcije, skupaj z razlago pomena simbolov, je prikazan na sliki 7:



Slika 7: Shematski prikaz navpičnih (a) in vodoravnih pomikov (b) [4]

Kjer je:

L - razpon nosilca, dvojna dolžina konzolnega nosilca;

w_0 - nadvišanje nosilca v začetnem neobremenjenem stanju;

w_1 - začetni upogibek zaradi stalne obtežbe;

w_2 - del upogibka zaradi dolgotrajnega vpliva stalne obtežbe (le pri sovprežnih konstrukcijah);

w_3 - upogibek zaradi spremenljive obtežbe;

w_{max} - upogibek v končnem stanju glede na ravnino med podporama;

u - celotni vodoravni pomik konstrukcije z višino H ;

u_i - relativni vodoravni pomik etaže z višino H_i .

Pri betonskih in sovprežnih konstrukcijah je potrebno upoštevati reološke vplive betona in zaporednost gradnje, zato je potrebno pomike razdeliti glede na obtežbe (stalne, spremenljive), ki te pomike povzročajo in na pomike v posameznih fazah gradnje.

Ko preverjamo delovanje ali poškodbe nosilne konstrukcije kot tudi poškodbe njenih nekonstrukcijskih delov in zaključnih oblog, se v kontrolo vključijo le tisti pomiki zaradi stalnih in spremenljivih vplivov, ki se pojavijo po (v)gradnji obravnavanih elementov. Kontrola delovanja strojev in udobja uporabnikov vključuje le pomike zaradi relevantnih spremenljivih vplivov (omejitev pomika w_3). Za videz omejujemo celoten pomik w_{max} .

4.1.3 Nihanja

Dinamični vplivi lahko zaradi svoje časovne in krajevne spremenljivosti povzročajo nezanemarljiva nihanja konstrukcij. Med potencialne vire nihanj sodijo vetrna obtežba na vitkih in visokih stavbah, človeška aktivnost, delovanje ekscentričnih strojev, premikanja mehanske opreme kot npr. dvigala in žerjavi, gradbeni posegi na okoliških objektih, promet in ostale sunkovite zunanje motnje.

Kriteriji človeškega udobja na vibracije se razlikujejo glede na tip rabe stavbe. V občutljivo skupino stavb spadajo laboratoriji in zdravstveni objekti, v običajno skupino spadajo bivalni in poslovni objekti. Manj občutljivi, pri katerih dovolimo milejše obnašanje, so športni in industrijski objekti. Kriteriji za konstrukcije obravnavajo stanja manjših povratnih poškodb nosilnih in nenosilnih elementov. Mednje spadajo razpokanost in krušenje predelnih sten in fasad, poškodbe odprtín, manjši posedki temeljev ter maksimalne amplitude nihanj podpor strojev. S kriteriji za vsebino v stavbah zagotavljamo nivo vibracij, ki je predvsem v raziskovalno-znanstvenih in zdravstvenih objektih potreben za primerno delovanje občutljivih naprav. Kriteriji nihanj za mostove (omejitev lastnih frekvenc) se nanašajo na pravilno in varno delovanje mostov, saj lahko pretirana nihanja povzročijo nestabilen prevoz tovora in nezadostni kontakt med vlakom in tiri [12].

Pri vseh pohodnih konstrukcijah in stavbah, v katerih se zadržujejo ljudje, se nelagodje uporabnikov prepreči z omejitvijo spodnje vrednosti lastne frekvence nihanj stropov. Visoke frekvence človeško telo slabše zazna. S tem ukrepom se izognemo tudi možnem pojavu resonance, ki nastopi, ko izvor nihanja vzbuja s podobno frekvenco, kot je lastna nihajna frekvenca konstrukcije. Ko se nihanji sinhronizirata, se vpliv nihanja močno poveča, kar lahko privede do velikih poškodb ali celo odpovedi konstrukcije [3]. V primeru, da so lastne frekvence konstrukcije nižje od dogovorjenih, je potrebna temeljita analiza dinamičnega odziva, ki vključuje robne pogoje, mase, togosti in dušenje konstrukcije.

4.2 Slovenski nacionalni dodatek k SIST EN 1990

ND podaja omejitve upogibov in vodoravnih pomikov konstrukcij ter omejitve nihanj (omejitve lastnih frekvenc in vertikalnih pomikov stropov). Vse pripadajoče mejne vrednosti so podane le za kontrolo s karakteristično kombinacijo vplivov. Mejne vrednosti, pri katerih pride do poškodb nekonstrukcijskih elementov, so zelo približna ocena. Razlikujejo se glede na funkcijo (pohodne in nepohodne strehe, tla, fasade, stene), pomembnost nosilnega elementa, ki jih nosi (glavni nosilec, lega) ter na lastnosti materiala (mavec, krhke obloge, gibke obloge) vgrajenega elementa [6]. Preseganje ali izbira drugačnih mejnih

vrednosti od teh podanih v ND (prikazanih v preglednici 3, 4 in 5) je dovoljeno le, če lahko pokažemo, da to ne zmanjšuje zanesljivosti konstrukcije in je naročnik s tem seznanjen.

4.2.1 Omejitve

Pomiki

Preglednica 3: Omejitve upogibov konstrukcij (razlaga simbolov na sliki 7.a) [2]

DEL KONSTRUKCIJE	Mejne vrednosti pri karakteristični kombinaciji vplivov	
	w_{max}	w_2
Strehe nasploh	L/200*	L/250
Pohodne strehe (ne le pri vzdrževanju)	L/250	L/300
Stropovi nasploh	L/250	L/300
Strehe in stropovi, ki nosijo krhke obloge (npr. mavec) in zelo toge predelne stene	L/300	L/350
Stropovi, ki podpirajo stebre, razen v primerih, če so ti upogibki izračunani pri celoviti analizi konstrukcije	L/400	L/500
*V primeru, da je w_{max} pomemben za videz konstrukcije	L/250	-

Preglednica 4: Omejitve vodoravnih pomikov konstrukcij (razlaga simbolov na sliki 7.b) [2]

VRSTA STAVBE	Mejne vrednosti pri karakteristični kombinaciji vplivov	
	u_i	u
Pritlične industrijske stavbe brez žerjavskih prog	Hi/150	-
Pritlične stavbe	Hi/300	-
Večnadstropne stavbe	Hi/300	H/500

Nihanja

Preglednica 5: Omejitve navpičnih pomikov in lastnih frekvenc stropov (pomen simbolov slika 7.a) [2]

VPLIV, zaradi katerega lahko nastanejo dinamični učinki	Mejne vrednosti pri karakteristični kombinaciji vplivov	
	lastna frekvenca (Hz)	$w_{tot}(mm)$
Hoja	3	28
Ples ali telovadba	5	10

Zadostuje, če izpolnimo le eno omejitev, saj s tem zadostimo tudi drugi, ker sta tako frekvenca kot upogib funkciji togosti.

Zastajanje vode

ND predlaga, da se zastajanju vode na strehi izognemo tako, da strešni površini, obremenjeni s pogosto kombinacijo vplivov, zagotovimo nagib večji od 2%. Pri položnih strehah dodatek priporoča nadvišanje strešnih nosilcev. Za kriterij ne ponudi shematskega prikaza naklonov.

4.3 Priporočila AISC za projektiranje jeklenih konstrukcij na MSU [Design Guide 3]

Vodič [3] vsebuje izčrpna priporočila glede projektiranja jeklenih konstrukcij na mejna stanja uporabnosti. Izdaja ga Ameriški inštitut za jeklene konstrukcije (AISC). Namen vodiča je zbrati vse smernice glede projektiranja na uporabnost konstrukcij, ki so bila do sedaj široko razpršena po različnih standardih, gradbenih predpisih, strokovnih člankih, tehničnih poročilih, proizvajalčevih literaturah, projektantskih pisarnah in znanju posameznih inženirjev.

Za ustrezno projektiranje na MSU se, kjer je relevantno, upošteva naslednje:

- nadvišanje;
- raztezanje in krčenje;
- vibracije, pomike in upogibe;
- deformabilnost spojev;
- korozijo.

Zgoraj naštetih področja se vključi v kriterije uporabnosti, s katerimi zagotovimo primerno obnašanje sledečih delov konstrukcij:

- notranjih predelnih sten in stropov;
- streh;
- fasad;
- celotne konstrukcije glede nihanja;
- opreme;
- strešnih oken.

Za različne tipe objektov, razdeljene po namembnosti, poda seznam najbolj relevantnih in pomembnih uporabnostnih zahtev. Ti objekti so: skladišča, proizvodne hale, industrijske hale/mlini, nakupovalni centri, izobraževalni objekti, zdravstveni in raziskovalni objekti, poslovni objekti, parkirni objekti, stanovanjske zgradbe, hoteli in arene.

Vodič v uvodu poda kombinacije vplivov za kontrolo obravnavanih mejnih stanj. Povzame jih iz standarda Ameriškega združenja gradbenih inženirjev (ASCE 7). Preverba kratkotrajnih učinkov vplivov na vertikalne pomike (upogibe), ki se nanašajo na videz, povratne razpoke in druge poškodbe nenosilnih elementov, se preveri po eni izmed obtežnih kombinacij; merodajna je tista z večjim učinkom:

- stalna (D) + koristna (L)
- stalna (D) + 0.5 · sneg (S)

Kontrolo mejnih stanj, povezana s časovno odvisnimi učinki (poves kompozitne medetažne plošče zaradi lezenja betona), posedki podpor in z ostalimi dolgotrajnimi učinki, se opravi s kombinacijo:

$$- \text{ stalna (D) + 0.5} \cdot \text{ koristna (L)}$$

Kombinacija za preverbo kratkotrajnih učinkov vplivov na horizontalne pomike se opravi s kombinacijo:

$$- \text{ stalna (D) + 0.5} \cdot \text{ koristna (L) + 0.7} \cdot \text{ veter (W)}$$

Uporabi se obtežba snega s povratno dobo 50 let. Izbiro vetrne obtežbe s povratno dobo 10 let vodič upravičuje zaradi večje pogostosti pojavljanja, skladnejšo s pričakovano delovno obtežbo v kontrolah MSU.

4.3.1 Področja obravnave s pripadajočimi omejitvami

Notranji nenosilni zidovi in stropovi

Vodič podaja različne možne načine pritrdjevanja stropnih inštalacij na nosilno konstrukcijo in izvedbo detajlov. Notranje stene najbolj opiše kot visoke nosilce, ki imajo sposobnost premoščanja povsesov tal. Najšibkejši del stene je v kotih vratnih odprtin zaradi vzdolžnega skrčka in mesta oslabitve. Rešitev je v izvedbi kontrolnih spojev na ustreznih razdaljah, ki služijo kot mesta nadzorovanih razpok. Poseben poudarek je na načinu zagotavljanja ravnih tal med procesom betoniranja kompozitnih etažnih plošč. Ker so jekleni nosilci v večini primerov nadvišani, zahteve ni lahko izpolniti. Vodič zbere vsa navodila in pravila za primerno nadvišanje nosilcev. Podaja omejitve upogibov, s čimer se izognemo problemu zaradi nabiranja sveže betonske mešanice v deformirano obliko plošče. Kriteriji MSU za predelne stene in stropove, s katerimi se izognemo njihovim poškodbam, so nanizani v preglednici 6:

Preglednica 6: Kriteriji pomikov za predelne stene in stropove [3]

ZAKLJUČNI SLOJ	Nosilni element	Deformacija	Obtežba	Mejna vrednost
Mavčni stropovi	strešni nosilec	upogib	0.5 x koristna ali 50-sneg	L/360
Ostali stropovi	strešni nosilec	upogib	0.5 x koristna ali 50-sneg	L/240
	stropni nosilec	upogib	stalna	L/360, < 2.5cm
Predelne stene	okvir	vodoravni pomik	10-veter	H/500
	strešni nosilec	upogib	0.5 x koristna ali 50-sneg	od 1 do 2.5cm
	stropni nosilec	upogib	0.5 x koristna	L/360, od 1 do 2.5cm

Strehe

Vodič podaja navodila za projektiranje ravnih ostrešij (< 2%), na katerih lahko zastaja voda in je takrat potrebno preveriti nosilnosti in stabilnost strehe. Kriterije za zagotavljanje nepropustnosti podaja ločeno za membranske in kovinske strehe. V primerih membranskih streh poudarja pomen pravilne izvedbe detajlov med stenami in streho ter okoli mest priključkov različnih vodov (električna napeljava, dimniki, zračniki, odprtine za odtočne cevi). Zaradi toplotnega raztezanja streh je pomembna delitev membran na več delov. Optimalno dreniranje se najlažje zagotovi s postavitvijo drenaž na stičišča streh s stebri in stenami, saj so te višine predhodno določene. Kovinske strehe imajo v splošnem velik naklon in drenažo z žlebovi, zato je potrebno preveriti le področje na obodu strehe zaradi razlik v togosti posameznih

elementov ostrešja. Vodič priznava velik pomen koncentriranih obtežb na upogibe strešnih pločevin. Kriteriji MSU za strehe so nanizani v preglednici 7:

Preglednica 7: Kriteriji pomikov za strehe [3]

VRSTE STREH	Nosilni element	Deformacija	Obtežba	Mejna vrednost
Membranske strehe	dilatacija (spoj)	raztezek	toplotna	od 45 do 60m
	pločevina (dvopoljna)	upogib	silna 1.35kN	L/200
	pločevinasto polje	upogib	koristna	L/240
	pločevinasto polje	upogib	silna 0.9kN	L/240
	višina lege	upogib	-	$f_y[kN/cm^2]/10 * razpon [cm]$
	palični nosilec	upogib	koristna	L/240
	palični okvir (prečka)	upogib	koristna	L/240
	strešne terase	upogib	stalna + koristna	L/240
	streha	naklon	drenaža	> 2%
Privijačene kovinske strehe	dilatacija	vodoravni pomik	toplotna	od 30 do 60m
	streha	naklon	drenaža	> 4%
	lega	upogib	50-sneg	L/240
	lega	upogib	stalna + 0.5 x 50-sneg, stalna + 0.24kN/m ²	pozitivna drenaža
Kovinske strehe "Klik sistem"	dilatacija	raztezek	toplotna	od 45 do 60m
	streha	naklon	drenaža	> 2%
	lega	upogib	50-sneg	L/150
	lega	upogib	stalna + 0.5 x 50-sneg, stalna + 0.24kN/m ²	pozitivna drenaža

Fasade

Vodič razlikuje med fasadnimi sistemi glede na način vertikalnega podpiranja fasad. Pozornost je treba nameniti primerni izvedbi stika fasade z okvirno konstrukcijo. Prav z ločitvijo teh dveh preprečimo dodatne napetosti v fasadi, ki se pojavijo zaradi deformiranja konstrukcije. Poleg tega morajo biti pomiki med deli fasade nadzorovani, s čimer se ohrani tesnilna funkcija stikov. Zahtevi dosežemo z večdelno fasado in s statično določeno pritrditvijo fasade na nosilno konstrukcijo. Pri nizkih stavbah lahko podpiranje izvedemo na temeljih, edini stik z okvirjem pa služi za stabilnost in prevzem horizontalnih obtežb. Omejujemo samo horizontalne pomike nosilne konstrukcije. Drugi način je pritrditev fasadnih plošč na stebre. Takrat se poleg horizontalnih omejuje tudi vertikalne pomike. Tretji način je pritrdjevanje na horizontalne obodne elemente okvirjev. Če celotna teža fasade, ki se vgrajuje, znaša več kot 25% celotne stalne obtežbe na nosilec, se kontrola opravi za začetno stalno obtežbo in obtežbo zaradi lastne teže fasade. Po postavitvi se omeji upogib nosilca zaradi koristne obtežbe, a je priporočeno upoštevati le del projektne koristne obtežbe (obremenitve so na robnih delih etaž zaradi manjše gostote uporabe pričakovano manjše). Podobno lahko v kontrolah upoštevamo le 50% projektne koristne obtežbe na vseh

etažah, razen na spodnji in zgornji, ker nas zanima le relativni vertikalni pomik. Kriteriji MSU za fasade, s katerimi zagotovimo njihovo delovanje in nepoškodovanost, so nanizani v preglednici 8:

Preglednica 8: Kriteriji pomikov za fasade [3]

PODPORA FASAD	Fasada/nosilni element	Pomik	Obtežba	Mejna vrednost
Temelji	pločevina/okvir	pomik pravokoten na zid	10-veter	od H/60 do H/100
	pločevina/fasadna lega	vodoravni pomik	10-veter	L/120
	pločevina/stebrji (horiz. obt.)	vodoravni pomik	10-veter	L/120
	montažne betonske stene/okvir	pomik pravokoten na zid	10-veter	H/100
	nearmirani opečni zidovi/okvir	pomik pravokoten na zid	10-veter	1.5mm razpoka na stiku
	armirani opečni zidovi/okvir	pomik pravokoten na zid	10-veter	H/200
	opečni zidovi/fasadna lega	vodoravni pomik	10-veter	L/240, < 4cm
	opečni zidovi/stebrji (horiz. obt.)	vodoravni pomik	10-veter	L/240, < 4cm
	opečni zidovi/preklada	upogib	stalna + koristna	L/600, < 8mm
	opečni zidovi/preklada	rotacija	stalna + koristna	1°
Stebri	montažne enote/steber	relativni skrček	0.5 x koristna	< 6mm
	montažne enote/okvir	popačenje okvirja	10-veter	H/500
Obodni nosilci	obešena fasada/okvir	popačenje okvirja	10-veter	H/500
	obešena fasada/obodni nosilec	upogib	stalna (pred fasado)	< 1cm
	obešena fasada/obodni nosilec	upogib	celotna stalna	L/480, < 1.6cm
	obešena fasada/obodni nosilec	upogib	0.5 x koristna	L/360, od 6 do 12mm
	obešena fasada/obodni nosilec	upogib	stalna (pred fasado) + teža fasade	L/600, < 1cm

Nihanja

Vodič obravnava odziv visokih stavb na delovanje vetrne obtežbe. Maksimalni pospešek priznava kot glavno merljivo količino, ki najbolje določa človeško občutljivost na nihanje, zato je v kriterijih udobja največkrat prisoten. Mnogokrat pa je uporabnejši koren srednje vrednosti kvadrata pospeška (RMS), ki je odvisen od dolgotrajnega časovnega poteka pospeškov. Smotrnost se kaže predvsem v primerih močnih dolgotrajnih neurij z vetrom. Tak je tudi 10-letni veter, pri katerem se opravi kontrola. Razmerje med maksimalnim in RMS pospeškom je podano s faktorjem, ki je odvisen od frekvence nihanja stavbe in znaša med 3,5 in 4,0. V primeru visokih stavb s centrično porazdeljeno maso in togostjo ter dominantnim prečnim odzivom glede na smer delovanja vetra, je razširjena uporaba neuradnega standarda (preglednica 9), ki ponuja smernice k ustreznem projektiranju za zagotovitev udobja uporabnikov. Z enačbami, ki so med seboj odvisne, poskušamo s spreminjanjem lastnosti konstrukcije doseči ciljne vrednosti pospeškov, kar nam je v pomoč pri začetni izbiri geometrije stavbe.

Preglednica 9: Ciljne vrednosti pospeškov [3]

PRIPOROČILA ZA POSPEŠKE stavbe glede zaznavanja nihanja, zaradi 10-letnega vetra				
Tip stavbe	maksimalni pospešek (ciljni)	RMS pospešek (ciljni)		
		$1 \leq T \leq 4$ $0.25 < f \leq 1.0$ $g_p = 4$	$4 \leq T < 10$ $0.1 < f \leq 0.25$ $g_p = 3.75$	$T \geq 10$ $f \leq 0.1$ $g_p = 3.5$
Javne	15-27 (21)	3.75-6.75 (5.25)	4.00-7.20 (5.60)	4.29-7.71 (6.00)
Stanovanjske	10-20 (15)	2.50-5.00 (3.75)	2.67-5.33 (4.00)	2.86-5.71 (4.29)
nihajni čas T [s], frekvenca f [Hz], pospešek [<i>mili-g</i>]				

Oprema

Vodič podaja kriterije uporabnosti za pravilno delovanje tekočih trakov, dvigal, različnih oblik žerjavov in ostale mehanske opreme. Obravnava tudi učinke delovanja teh naprav na obnašanje konstrukcije z namenom zagotavljanja še ostalih zahtev MSU.

4.3.2 Sklep

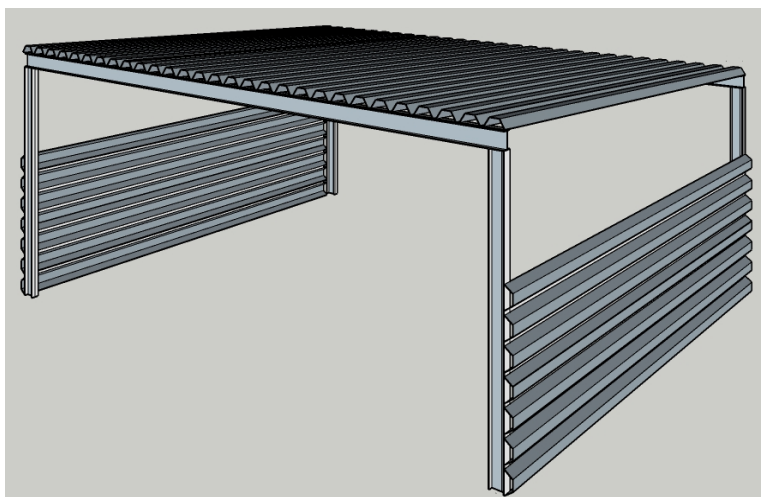
Kontrola kratkotrajnih učinkov je z ASCE kombinacijami vplivov izvedena pri višjem nivoju vplivov, kot jih določi SIST EN 1990 s kontrolo s pogosto kombinacijo vplivov. Prav tako to velja za dolgotrajne učinke, saj so ti preverjeni pri višjem nivoju vplivov kot v SIST EN 1990, ki določa kontrolo z navidezno stalno kombinacijo vplivov. Priporočeni kriteriji za upogibe in vodoravne pomike konstrukcijskih elementov, ki so podani med posameznimi poglavji, so ločeni na posamezen relevanten vpliv. To pomeni, da se pomike, ki so posledica različnih vplivov, omejuje ločeno. Kriteriji za preverjanje istih mejnih stanj, se med seboj zaradi drugačnih velikosti obtežb, pri katerih se izvede kontrola, ne ujemajo vedno. Najbolj je to vidno pri kontroli upogiba strešnih in stropnih nosilcev z namenom preprečitve poškodb nekonstrukcijskih elementov. Prvi določajo kontrolo s polno projektno koristno obtežbo ali pa s polovično obtežbo snega (za strehe), nato pa jo v nadaljevanju kriteriji določajo ravno obratno.

Ker so kriteriji zbrani iz množice na široko razpršene literature, je pomembno, da se podane kriterije uporabnosti vzame z rezervo. Za natančnejša pojasnila se je potrebno obrniti na izvirno literaturo, ki je navedena v vodiču. Podane mejne vrednosti za pomike niso nujno najbolj ustrezne in jih je morda potrebno prilagoditi potrebam obravnavanega materiala. Za dodatne zahteve glede uporabnosti se dogovori med posvetom z naročnikom.

5 PRIMER I: OKVIR

5.1 Zasnova

Jekleni nadstrešek za avtomobile je zasnovan kot serija dveh okvirjev, ki sta med seboj oddaljena 6 metrov. Povezana sta s strešno trapezno pločevino, s katero tudi prekrijemo površino med nasproti ležečima stebroma okvirjev (v šibki smeri). Razpon obeh okvirjev je 8 metrov. Višina prednjega je 3 metre, drugi je nižji, s čimer se zagotovi potreben naklon (3 %) za odtekanje vode s strehe. Konstrukcija je členkasto podprta. Uporabljeno jeklo je razreda S235. Primer nadstreška je prikazan na sliki 8:



Slika 8: Primer konstrukcije

Predpostavimo, da je posamezen okvir podprt tako, da stabilnost okvirja izven ravnine ni problematična, ker se bočno podpiranje zagotovi s trapezno pločevino. Stabilnost v ravnini okvirja je zagotovljena s togima stikoma med prečko in stebroma. Računski model za nadstrešek opišemo z ravninskim okvirjem (slika 9).



Slika 9: Računski model okvirja

5.2 Obtežbe

Zaradi enostavnosti računa vetra ne upoštevamo. Prav tako veter nima površine na katero bi se lahko uprl. Srk vetra deluje na kritino, kar povzroča natege v stebrih, to pa je s stališča stabilnosti ugodno.

Sneg (na strehi):

$$s_k(\text{na tleh}) = 2 \text{ kN/m}^2$$

$$s = 0.8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 1.6 \text{ kN/m}^2$$

$$s_{lin} = 1.6 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 3 \text{ m} = 4.8 \text{ kN/m}$$

Stalna:

$$g_k = 0.3 \text{ kN/m}^2$$

$$g_{k,lin} = 0.3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 3 \text{ m} = 0.9 \text{ kN/m}$$

Stalna lastna g_{last} je izračunana s SAP 2000.

5.3 Elastična globalna analiza

5.3.1 Mejno stanje nosilnosti (MSN)

Kombinacija obtežb za MSN:

$$1,35 \cdot g_{last} + 1,35 \cdot g_{k,lin} + 1,5 \cdot s_{lin}$$

Predhodno dimenzioniranje okvirja je bilo izvedeno z elastično analizo prvega reda, s katero sta bila izbrana začetna prereza stebra in prečke:

→ Izberemo prečko: IPE200 in
steber: HEA120

Nadomestne globalne nepopolnosti

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1.73 \rightarrow \alpha_h = 1.0$$

$$\alpha_m = \sqrt{0.5 \cdot \left(1 + \frac{1}{2}\right)} = 0.866$$

$$\phi = \frac{1}{200} \cdot 1.0 \cdot 0.866 = 0.00433 \cdot 1000 = 4.33 \text{ mm/m}$$

Globalno nepopolnost vključim v globalno analizo z nadomestno horizontalno silo (EHF), ki prijemlje na stiku prečke in stebra:

$$H_{Ed} = \phi \cdot N_{Ed}$$

$$N_{Ed} = 2 \cdot 35.66 \text{ kN (elastična analiza po TPR)} = 71.32 \text{ kN}$$

$$H_{Ed} = 0.00433 \cdot 71.32 \text{ kN} = 0.309 \text{ kN}$$

Lokalne nepopolnosti

Steber:

$$\bar{\lambda} = \frac{l_u}{93.9 \cdot \epsilon \cdot i_y} = \frac{300}{93.9 \cdot 1 \cdot 4.38 \text{ cm}} = 0.65$$

$$0.65 \leq 0.5 \cdot \sqrt{25.3 \text{ cm}^2 \cdot \frac{23.5 \text{ kN/m}^2}{35.66 \text{ kN}}} = 2.04$$

→ Ker je za vsak element omejitev relativne vitkosti izpolnjena, lokalnih nepopolnosti v globalni analizi ni potrebno upoštevati. Vključimo jih v kontroli stabilnosti na nivoju posameznih elementov. Uklonska dolžina elementov je enaka njihovi sistemski dolžini.

Kritični uklonski koeficient

$$\bar{\lambda} \leq 0.3 \cdot \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{Ed}}}$$

$$\epsilon (\text{S235}) = 1$$

$$i_y (\text{iz preglednic}) = 8.26 \text{ cm}$$

$$\bar{\lambda} = \frac{l_u}{93.9 \cdot \epsilon \cdot i_y} = \frac{800}{93.9 \cdot 1 \cdot 8.26 \text{ cm}} = 1.03$$

$$1.03 \leq 0.3 \cdot \sqrt{28.5 \text{ cm}^2 \cdot \frac{23.5 \text{ kN/m}^2}{8.56 \text{ kN}}} = 2.65$$

Ker ima prečka manjši naklon kot 26 stopinj in ker je omejitev relativne vitkosti izpolnjena, lahko kritični uklonski koeficient izračunamo z enačbo:

$$\alpha_{cr} = \left(\frac{H_{Ed}}{V_{Ed}} \right) \cdot \left(\frac{h}{\delta_{H,Ed}} \right)$$

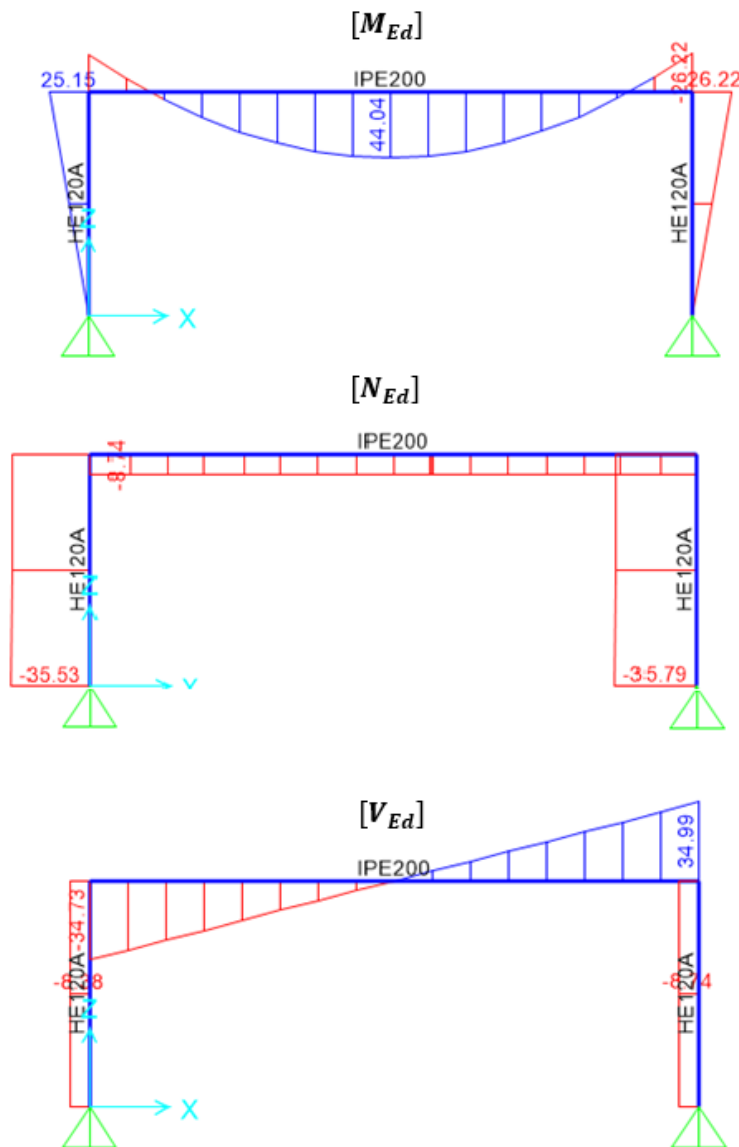
Pomik $\delta_{H,Ed}$ zaradi horizontalne obtežbe (nadomestna horizontalna sila-EHF), izračunan s SAP 2000, znaša 0.0016 m.

$$\alpha_{cr} = \left(\frac{0.308 \text{ kN}}{71.32 \text{ kN}} \right) \cdot \left(\frac{3 \text{ m}}{0.0016 \text{ m}} \right) = 7.59$$

$$3 < \alpha_{cr} \leq 10$$

To pomeni, da moramo upoštevati teorijo drugega reda (TDR), ki pa jo v tem primeru lahko upoštevamo tako, da učinke horizontalnih obtežb pomnožimo s faktorjem k_δ .

Notranje statične količine (TDR + globalne nepopolnosti)



Slika 10: Notranje statične količine

Kontrola prečke (IPE200)

PROJEKTNE NOTRANJE KOLIČINE:

$$M_{y,Ed} = 44.04 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -8.74 \text{ kN (vpliv osne sile zanemarimo)}$$

$$V_{Ed} = 34.99 \text{ kN}$$

RAZRED KOMPAKTNOSTI PREREZA:

- Stojina (notranji tlačeni del)

$$\frac{c}{t_w} = \frac{15.9}{0.56} = 28.39 \leq 33 \rightarrow 1. \text{ razred kompaktnosti}$$

- Pasnica (previsni del)

$$\frac{c}{t_f} = \frac{(10 - 0.56)/2}{0.85} = 5.55 \leq 9 \rightarrow 1. \text{ razred kompaktnosti}$$

→ Prerez spada v 1. razred kompaktnosti

Nosilnost prereza:

- Plastična upogibna nosilnost

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{MO}} = \frac{221 \text{ cm}^3 \cdot 23.5 \text{ kN/cm}^2}{1} = 5193.5 \text{ kNcm} \geq M_{y,Ed} = 4404 \text{ kNcm}$$

- Strižna nosilnost

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{MO}} = \frac{1.2 \cdot 18.3 \text{ cm} \cdot 0.56 \text{ cm} \cdot 23.5 \text{ kN/cm}^2}{\sqrt{3} \cdot 1} = 166.85 \text{ kN} \geq V_{Ed} = 34.99 \text{ kN}$$

- Interakcija upogiba in striga

$$V_{Ed} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd}$$

Odpornost elementov proti nestabilnosti:

- Potrebna razdalja med bočnimi podporami (metoda tlačene pasnice):

$$A_f = b \cdot t_f + \frac{(h_w \cdot t_w)}{6} = 10 \text{ cm} \cdot 0.85 \text{ cm} + \frac{18.3 \text{ cm} \cdot 0.56 \text{ cm}}{6} = 10.21 \text{ cm}^2$$

$$I_f = \frac{b^3 \cdot t_f}{12} = \frac{10^3 \text{ cm} \cdot 0.85 \text{ cm}}{12} = 70.83 \text{ cm}^4$$

$$i_{f,z} = \sqrt{\frac{I_f}{A_f}} = \sqrt{\frac{70.83 \text{ cm}^4}{10.21 \text{ cm}^2}} = 2.63 \text{ cm}$$

$$L_c \leq 0.5 \cdot 93.9 \cdot \varepsilon \cdot i_{f,z} = 0.5 \cdot 93.9 \cdot 2.63 \text{ cm} = 123.5 \text{ cm}$$

→ Izberemo 6 bočnih podpor; $L_c = 114.3 \text{ cm}$

Kontrola stebra (HEA120)

PROJEKTNE NOTRANJE KOLIČINE:

$$M_{y,Ed} = 26.22 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -35.79 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 8.74 \text{ kN}$$

RAZRED KOMPAKTNOSTI PREREZA:

- Stojina (notranji tlačeni del)

$$\frac{c}{t_w} = 14.8 \leq 33 \rightarrow 1. \text{ razred kompaktnosti}$$

- Pasnica (previsni del)

$$\frac{c}{t_f} = 7.19 \leq 9 \rightarrow 1. \text{ razred kompaktnosti}$$

→ Prerez spada v 1. razred kompaktnosti

Nosilnost prereza:

- Kontrola normalnih napetosti

$$\sigma_{max,Ed} = \frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{Ed}}{W_{pl}} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$\frac{35.79 \text{ kN}}{25.3 \text{ cm}^2} + \frac{2622 \text{ kNcm}}{119.4 \text{ cm}^3} = 23.37 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \leq 23.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

- Strig

$$V_{pl,Rd} = 138.18 \text{ kN} \geq V_{Ed} = 8.74 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd}$$

→ Vpliva prečne sile na nosilnost ni potrebno upoštevati.

Odpornost elementov proti nestabilnosti:

- Interakcija uklona okoli močne osi y in upogiba

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y A f_y / \gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} W_y f_y / \gamma_{M1}} \leq 1$$

$$\frac{35.79 \text{ kN} \cdot 1}{0.810 \cdot 25.3 \text{ cm}^2 \cdot 23.5 \text{ kN/cm}^2} + 0.620 \frac{2622 \text{ kNcm} \cdot 1}{1 \cdot 119.4 \text{ cm}^3 \cdot 23.5 \text{ kN/cm}^2} = 0.654 \leq 1$$

$$i_y = 4.89 \text{ cm}$$

$$\bar{\lambda}_y = \frac{l_u}{i_y \cdot \lambda_1} = \frac{300 \text{ cm}}{4.89 \text{ cm} \cdot 93.9 \cdot 1} = 0.653$$

Uklonska krivulja ($h/b \leq 1.2$, $t_f \leq 100 \text{ mm}$, y-y, S235): b

$$\alpha(b) = 0.34$$

$$\Phi = 0.5 \left(1 + \alpha(\bar{\lambda}_y - 0.2) + \bar{\lambda}_y^2 \right) = 0.5(1 + 0.34(0.653 - 0.2) + 0.653^2) = 0.790$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0.790 + \sqrt{0.790^2 - 0.653^2}} = 0.810$$

$$C_{my} = 0.6 \quad (\psi = 0)$$

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0.2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y A f_y / \gamma_{M1}} \right)$$

$$k_{yy} = 0.6 \left(1 + (0.653 - 0.2) \frac{35.79 \text{ kN} \cdot 1}{0.810 \cdot 25.3 \text{ cm}^2 \cdot 23.5 \text{ kN/cm}^2} \right) = 0.620$$

- Interakcija uklona okoli šibke osi z in upogiba

Ni merodajna, ker je steber podprt.

5.3.2 Karakteristična MSU

Karakteristična kombinacija obtežb za MSU:

$$1,0 \cdot g_{last} + 1,0 \cdot g_{k,lin} + 1,0 \cdot s_{lin}$$

S karakteristično kombinacijo vplivov se preveri elastičnost konstrukcije (pojav poškodb). V tem primeru s kontrolo $\sigma_{Ed,ser}$ preprečimo plastifikacijo najbolj obremenjenega vlakna. Teorijo drugega reda se mora upoštevati tudi v MSU, vendar v tem primeru ta ni merodajna, ker v horizontalni smeri delujejo samo majhne izbočne sile. Obnašanje konstrukcije je skoraj linearno elastično.

Kontrola napetosti:

$$\sigma_{Ed,ser} \leq f_y$$

$$\sigma_{Ed,ser} = \frac{M_{Ed}}{W_{el}} + \frac{N_{Ed}}{A} = \frac{2992 \text{ kNcm}}{194 \text{ cm}^3} + \frac{5.82 \text{ kN}}{28.5 \text{ cm}^2} = 15.63 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \leq 23.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Ni potrebe po kontroli napetosti na nivoju karakteristične MSU, ker je projektna obtežba veliko manjša kot za MSN, čeprav je potrebno računati na elastični in ne več na plastični odpornostni moment. S tem ko smo dokazali, da je napetost v MSN manjša od meje tečenja jekla, je tudi v MSU že izpolnjen kriterij elastičnosti, kar pomeni, da ta ni merodajen.

Kontrola horizontalnih pomikov konstrukcije:

Horizontalnega pomika konstrukcije ni.

Kontrola navpičnih pomikov konstrukcije:

V SAP 2000 je izveden račun navpičnega pomika prečke, ki znaša $w_{kar} = 4.38 \text{ cm}$.

Mejna vrednost (ND k SIST EN 1990) pri karakteristični kombinaciji za strehe nasploh:

$$\frac{L}{200} = \frac{800 \text{ cm}}{200} = 4 \text{ cm} \leq w_{kar} \quad \text{✗}$$

Kriterij za upogib na nivoju karakteristične MSU ni izpolnjen. Priporočeno mejno vrednost je pri karakteristični kombinaciji težko izpolniti. Prečko bi bilo treba povečati, kar pomeni, da je v tem primeru odločilno projektiranje na MSU. To je logično, saj okvir premošča velik razpon z ravno prečko.

Ta kontrola upogiba je popolnoma nepomembna, saj smo (z vedno izpolnjeno kontrolo napetosti) dokazali, da je okvir pri karakteristični MSU v elastičnem stanju, kar pomeni, da so upogibki povratni in tako do poškodb nosilne konstrukcije ne pride. Poleg tega je obtežba zaradi karakteristične kombinacije vplivov izjemna, saj se v povprečju pojavi le enkrat na 50 let. Posledično v konstrukciji pripadajočih pomikov ni smiselno upoštevati.

Konstrukcija ima strešno trapezno pločevino nosilno v drugi smeri, zato omejitev upogiba prečke zaradi preprečitev poškodb kritine ni pomembna.

5.3.3 Pogosta MSU

Pogosta kombinacija obtežb za MSU:

$$1,0 \cdot g_{last} + 1,0 \cdot g_{k,lin} + 0,2 \cdot s_{lin}$$

Kontrola horizontalnih pomikov konstrukcije:

Horizontalnega pomika konstrukcije ni.

Kontrola navpičnih pomikov konstrukcije:

V SAP 2000 je izveden račun navpičnega pomika prečke, ki znaša $w_{pog} = 1.54$ cm.

Konstrukcija je popolnoma v elastičnem stanju, zato SIST EN 1990 dovoljuje kontrolo pomikov s pogosto kombinacijo vplivov, vendar ND k SIST EN 1990 podaja priporočene vrednosti pomikov le za karakteristično obtežno kombinacijo.

Mejna vrednost (ND k SIST EN 1990) pri karakteristični kombinaciji za strehe nasploh:

$$\frac{L}{200} = \frac{800 \text{ cm}}{200} = 4 \text{ cm} \geq w_{pog} \checkmark$$

Kriterij pomikov na nivoju pogoste MSU je prelahko izpolniti, saj je projektna obtežba določena kot ena petina karakteristične snežne obtežbe, kar je malo in je v realnosti pogost pojav. Taka omejitev pomika ne pomeni nujno zadostne ustreznosti, saj je lahko prevečkrat presežena.

5.4 Plastična globalna analiza (MTPČ)

5.4.1 Mejno stanje nosilnosti (MSN)

Zagotoviti moramo bočne podpore na mestih nastanka plastičnih členkov. V našem primeru se to izvede s prečkami in strešno pločevino.

Izbira stebra

Metodo togih plastičnih členkov se lahko uporabi, če TDR ni pomemben. Tako lahko računamo po plastični analizi prvega reda. To lahko storimo, če kritični uklonski koeficient za plastično globalno analizo ustreza pogoju:

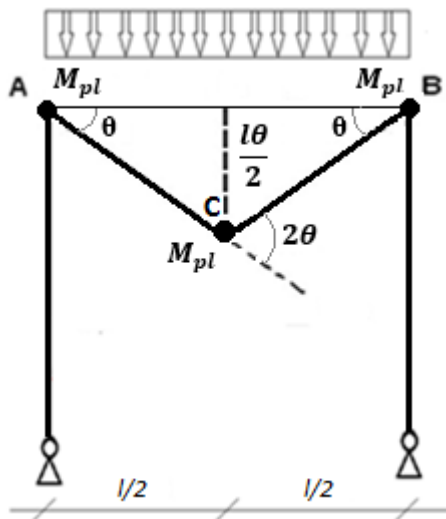
$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 15$$

→ Izberemo steber: HEA240 ($\alpha_{cr} = 15.4$)

Izbira prečke

PORUŠNI MEHANIZEM

Zaradi zelo majhne horizontalne sile je merodajen lokalni porušni mehanizem (porušitev prečke).



Slika 11: Merodajni porušni mehanizem

$$\delta W_{\text{not}} = \delta W_{\text{zun}}$$

$$4\theta M_{\text{pl}} = q \cdot \frac{l}{2} \cdot \frac{\theta l}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot 2$$

$$4\theta M_{\text{pl}} = \frac{q\theta l^2}{4}$$

$$M_{\text{pl}} = \frac{ql^2}{16}$$

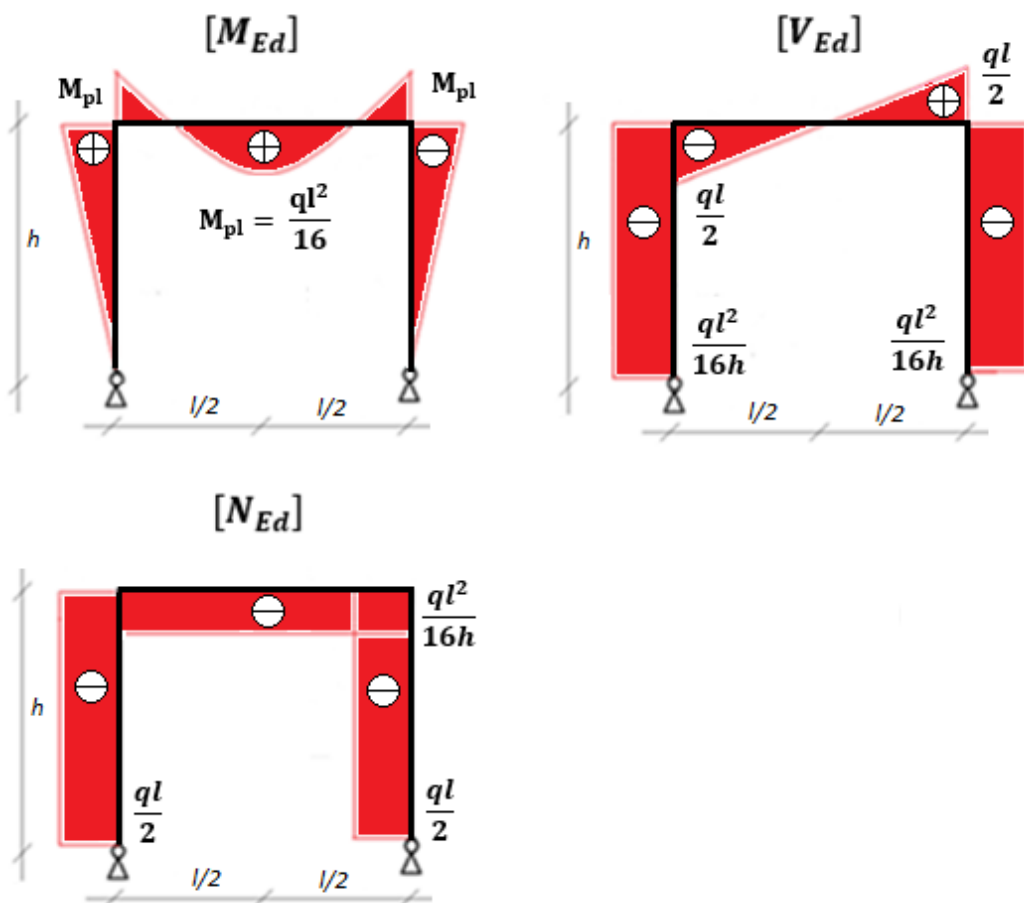
→ Izberem prečko IPE180

$$W_{\text{pl}} = 166.4 \text{ cm}^3, A = 23.9 \text{ cm}^2$$

$$q_{Ed} = 1.35 \cdot \left(0.9 \text{ kN/m} + \frac{23.9 \text{ cm}^2}{100^2} \cdot 78 \text{ kN/m}^3 \right) + 1.5 \cdot 4.8 \text{ kN/m} = 8.67 \text{ kN/m}$$

$$M_{\text{pl}} = 166.4 \text{ cm}^3 \cdot 23.5 \text{ kN/cm}^2 = 3910.4 \text{ kNcm} \geq \frac{8.67 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot (800 \text{ cm})^2}{16 \cdot 100} = 3468 \text{ kNcm} \checkmark$$

Notranje statične količine



Slika 12: Notranje statične količine

Kontrola prečke (IPE180)

PROJEKTNE NOTRANJE KOLIČINE:

$$M_{y,Ed} = 34.68 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = -17.34 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 34.68 \text{ kN}$$

Razred kompaktnosti prereza:

- Stojina (notranji tlačeni del)

$$\frac{c}{t_w} = 27.55 \leq 33 \rightarrow 1. \text{ razred kompaktnosti}$$

- Pasnica (previsni del)

$$\frac{c}{t_f} = 5.36 \leq 9 \rightarrow 1. \text{ razred kompaktnosti}$$

→ Prerez spada v 1. razred kompaktnosti, zato je izvedba plastične analize možna.

Nosilnost prereza:

- Kontrola normalnih napetosti

$$\sigma_{max,Ed} = \frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{Ed}}{W_{pl}} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$\frac{17.34 \text{ kN}}{23.9 \text{ cm}^2} + \frac{3468 \text{ kNcm}}{166.4 \text{ cm}^3} = 21.57 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \leq 23.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

- Strig

$$V_{pl,Rd} = 141.52 \text{ kN} \geq V_{Ed} = 34.68 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd}$$

→ Vpliva prečne sile na nosilnost ni potrebno upoštevati

Odpornost elementov proti nestabilnosti:

- Potrebna razdalja med bočnimi podporami (metoda tlačene pasnice)

$$A_f = 8.73 \text{ cm}^2$$

$$I_f = 50.24 \text{ cm}^4$$

$$i_{f,z} = 2.40 \text{ cm}$$

$$L_c \leq 112.6 \text{ cm}$$

→ Izberemo 7 bočnih podpor; $L_c = 100 \text{ cm}$

Kontrola stebra (HEA240)

PROJEKTNE NOTRANJE KOLIČINE:

$$M_{y,Ed} = 34.68 \text{ kN}$$

$$N_{Ed} = -36.48 \text{ kN}$$

$$V_{Ed} = 17.34 \text{ kN}$$

Razred kompaktnosti prereza:

- Stojina (notranji tlačeni del)

$$\frac{c}{t_w} = 21.87 \leq 33 \rightarrow 1. \text{ razred kompaktnosti}$$

- Pasnica (previsni del)

$$\frac{c}{t_f} = 9.69 \leq 19 \rightarrow 2. \text{ razred kompaktnosti}$$

→ Prerez spada v 2. razred kompaktnosti

Nosilnost prereza:

- Kontrola normalnih napetosti

$$\sigma_{max,Ed} = \frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{Ed}}{W_{pl}} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$\frac{36.48 \text{ kN}}{76.8 \text{ cm}^2} + \frac{3468 \text{ kNcm}}{745 \text{ cm}^3} = 5.13 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \leq 23.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Odpornost elementa proti nestabilnosti

- Interakcija uklona okoli močne osi in upogiba

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y A f_y / \gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} W_y f_y / \gamma_{M1}} \leq 1$$

$$\frac{36.48 \text{ kN} \cdot 1}{0.957 \cdot 76.8 \text{ cm}^2 \cdot 23.5 \text{ kN/cm}^2} + 0.601 \frac{3468 \text{ kNcm} \cdot 1}{1 \cdot 745 \text{ cm}^3 \cdot 23.5 \text{ kN/cm}^2} = 0.140 \leq 1$$

$$i_y = 10.10 \text{ cm}$$

$$\bar{\lambda}_y = \frac{l_u}{i_y \cdot \lambda_1} = \frac{300 \text{ cm}}{10.10 \text{ cm} \cdot 93.9 \cdot 1} = 0.316$$

Uklonska krivulja ($h/b \leq 1.2$, $t_f \leq 100 \text{ mm}$, y-y, S235): b

$$\alpha(b) = 0.34$$

$$\Phi = 0.5 \left(1 + \alpha(\bar{\lambda}_y - 0.2) + \bar{\lambda}_y^2 \right) = 0.5(1 + 0.34(0.316 - 0.2) + 0.316^2) = 0.570$$

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0.570 + \sqrt{0.570^2 - 0.316^2}} = 0.957$$

$$C_{my} = 0.6 \ (\psi = 0)$$

$$k_{yy} = C_{my} \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0.2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y A f_y / \gamma_{M1}} \right)$$

$$k_{yy} = 0.6 \left(1 + (0.316 - 0.2) \frac{36.48 \text{ kN} \cdot 1}{0.957 \cdot 76.8 \text{ cm}^2 \cdot 23.5 \text{ kN/cm}^2} \right) = 0.601$$

- Interakcija uklona okoli šibke osi in upogiba

Ni merodajna, ker je steber podprt.

5.4.2 Karakteristična MSU

Karakteristična kombinacija obtežb za MSU:

$$1,0 \cdot g_{last} + 1,0 \cdot g_{k,lin} + 1,0 \cdot s_{lin}$$

Kontrola napetosti:

ND določa, da je v primeru, ko je za projektiranje na MSN uporabljena globalna plastična analiza, potrebno opraviti kontrolo napetosti na nivoju karakteristične MSU, s katero pokažemo, da je konstrukcija v elastičnem območju. V tem primeru dokažemo, da se v MSU ne začne plastifikacija prereza.

$$\sigma_{Ed,ser} \leq f_y$$

$$H_{Ed} = \phi \cdot N_{Ed}(TPR) = 2 \cdot 25.34 \text{ kN} \cdot \frac{4.33 \text{ mm}}{\text{m}} = 0.219 \text{ kN}$$

$$\sigma_{Ed,ser} = \frac{M_{Ed}}{W_{el}} + \frac{N_{Ed}}{A} = \frac{3037 \text{ kNcm}}{146 \text{ cm}^3} + \frac{10.12 \text{ kN}}{23.9 \text{ cm}^2} = 21.23 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \leq 23.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

→ Konstrukcija je v MSU v elastičnem stanju, kar pomeni, da se poškodbe ne pojavijo.

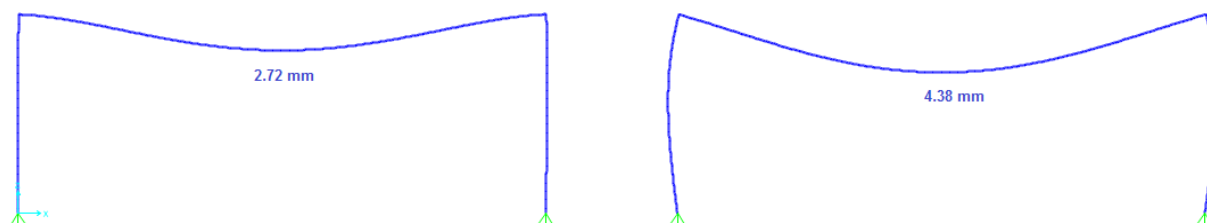
Motivacija za kontrolo je neutemeljen strah, da bi se prerazporeditev napetosti zgodila že na nivoju MSU. Sposobnost razvoja plastičnih členkov bi lahko pomenila velike nepovratne deformacije, ki morda niso več primerne glede MSU. Dejansko kontrola ni potrebna, ker je v tem primeru razlika med nivojema obtežbe za MSN in za MSU večja od plastične rezerve konstrukcije. Velja, da je s kontrolo MSN izpolnjena tudi kontrola napetosti v MSU.

Kontrola horizontalnih pomikov konstrukcije:

Horizontalni pomiki stebrov so minimalni.

Kontrola navpičnih pomikov konstrukcije:

V SAP 2000 je izveden račun navpičnega pomika prečke, ki znaša $w_{kar} = 2.72$ cm.



Slika 13: Primerjava pomikov plastično (levo) in elastično projektiranega okvirja (desno)

Vidimo, da je upogib prečke pri plastično projektirani konstrukciji manjši kot upogib pri elastično projektirani konstrukciji, pa čeprav je prerez prečke pri konstrukciji dobljeni z elastično analizo večji. V izogib upoštevanja TDR pri plastični analizi, sem izbral močan steber, ki se zaradi večje togosti pod obremenitvijo manj upogne, zaradi česar je vertikalni pomik nanj pripete prečke manjši.

Mejna vrednost (ND k SIST EN 1990) pri karakteristični kombinaciji za strehe nasploh:

$$\frac{L}{200} = \frac{800 \text{ cm}}{200} = 4 \text{ cm} \geq w_{kar} \checkmark$$

5.4.3 Pogosta MSU

Pogosta kombinacija obtežb za MSU:

$$1,0 \cdot g_{last} + 1,0 \cdot g_{k,lin} + 0,2 \cdot s_{lin}$$

Kontrola horizontalnih pomikov konstrukcije:

Horizontalnega pomika konstrukcije ni.

Kontrola navpičnih pomikov konstrukcije:

V SAP 2000 je izveden račun navpičnega pomika prečke, ki znaša $w_{pog} = 0.95$ cm.

Mejna vrednost (ND k SIST EN 1990) za karakteristično kombinacijo za strehe nasploh:

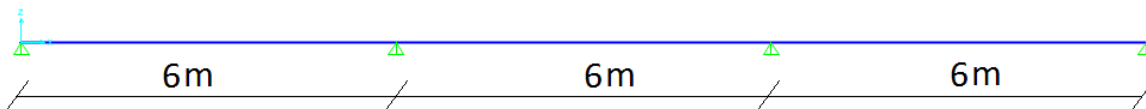
$$\frac{L}{200} = \frac{800 \text{ cm}}{200} = 4 \text{ cm} \geq w_{pog} \checkmark$$

Omejitev upogiba z mejno vrednostjo za karakteristično kombinacijo je na nivoju pogoste MSU z lahkoto izpolnjena.

6 PRIMER II: LEGA

6.1 Zasnova

Jeklana lega s tremi polji je členkasto podprta. Vsako polje je dolgo 6 metrov. Razdalja do sosednje lege znaša 2.5 metra. Uporabljeno jeklo je razreda S275.



Slika 14: Računski model lege

Predpostavimo, da je lega izven ravnine podprta tako, da stabilnost ni problematična.

6.2 Obtežbe

Sneg (na strehi):

$$s_k \text{ (na tleh)} = 2 \text{ kN/m}^2$$

$$s = 0.8 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2 \text{ kN/m}^2 = 1.6 \text{ kN/m}^2$$

$$s_{lin} = 1.6 \text{ kN/m}^2 \cdot 2.5 \text{ m} = 4.0 \text{ kN/m}$$

Stalna:

$$g_k = 0.2 \text{ kN/m}^2$$

$$g_{k,lin} = 0.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 2.5 \text{ m} = 0.5 \text{ kN/m}$$

Stalna lastna g_{last} je izračunana s SAP 2000.

6.3 Elastična globalna analiza

6.3.1 Mejno stanje nosilnosti (MSN)

Kombinacija obtežb za MSN:

$$1,35 \cdot g_{last} + 1,35 \cdot g_{k,lin} + 1,5 \cdot s_{lin}$$

Predhodno dimenzioniranje nosilca je bilo izvedeno z elastično analizo prvega reda, s katero je bil izbran njegov začetni prerez.

→ Izberem nosilec IPE160

$$W_{el} = 109 \text{ cm}^3, W_{pl} = 123.8 \text{ cm}^3, A = 20.1 \text{ cm}^2$$

Kontrola nosilca (IPE160):

PROJEKTNE NOTRANJE KOLIČINE:

$$M_{Ed} = 2477 \text{ kNcm}$$

$$V_{Ed} = 24.8 \text{ kN}$$

Nosilnost prereza:

- Upogib

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{MO}} = \frac{123.8 \text{ cm}^3 \cdot 27.5 \text{ kN/cm}^2}{1} = 3404.5 \text{ kNcm} \geq M_{y,Ed} = 2477 \text{ kNcm}$$

- Strig

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{MO}} = \frac{1.2 \cdot 14.5 \text{ cm} \cdot 0.50 \text{ cm} \cdot 27.5 \text{ kN/cm}^2}{\sqrt{3} \cdot 1} = 138.13 \text{ kN} \geq V_{Ed} = 24.8 \text{ kN}$$

- Upogib, strig in osna sila

$$V_{Ed} \leq 0.5 \cdot V_{pl,Rd}$$

6.3.2 Karakteristična MSU

Karakteristična kombinacija obtežb za MSU:

$$1,0 \cdot g_{last} + 1,0 \cdot g_k + 1,0 \cdot s_{lin}$$

Kontrola napetosti:

Ni potrebe po kontroli napetosti na nivoju karakteristične MSU, ker je obtežba mnogo nižja kot v MSN in je s tem kontrola že izpolnjena.

→ Konstrukcija je na nivoju karakteristične MSU v elastičnem stanju, kar pomeni, da se poškodbe ne pojavijo.

Kontrola navpičnih pomikov konstrukcije:

V SAP 2000 je izveden račun upogiba lege, ki znaša $w_{kar} = 2.31 \text{ cm}$.

Mejna vrednost (ND k SIST EN 1990) za karakteristično kombinacijo za strehe nasploh:

$$\frac{L}{200} = \frac{600 \text{ cm}}{200} = 3 \text{ cm} \geq w_{kar} \checkmark$$

Kriterij za upogibe je nepomemben, ker smo dokazali (s kontrolo napetosti), da je konstrukcija na nivoju karakteristične MSU v elastičnem stanju.

6.3.3 Pogosta MSU

Pogosta kombinacija obtežb za MSU:

$$1,0 \cdot g_{last} + 1,0 \cdot g_k + 0,2 \cdot s_{lin}$$

Kontrola navpičnih pomikov konstrukcije:

V SAP 2000 je izveden račun upogiba lege, ki znaša $w_{pog} = 0,72 \text{ cm}$.

Mejna vrednost (ND k SIST EN 1990) za karakteristično kombinacijo za strehe nasploh:

$$\frac{L}{200} = \frac{600 \text{ cm}}{200} = 3 \text{ cm} \geq w_{pog} \checkmark$$

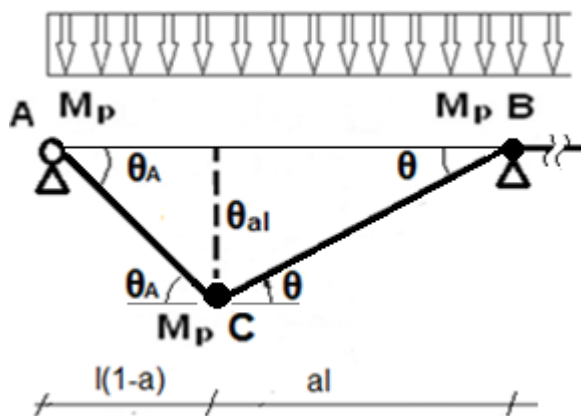
Omejitev upogiba z mejno vrednostjo za karakteristično kombinacijo, je na nivoju pogoste MSU prelahko izpolniti.

6.4 Plastična globalna analiza (MTPČ)

6.4.1 Mejno stanje nosilnosti (MSN)

PORUŠNI MEHANIZEM

Obtežba je enakomerna, vsa tri polja so enako dolga. Večji momenti so v zunanjem polju, ki je zaradi tega merodajno.



Slika 15: Porušni mehanizem za zunanje polje

Rotacija θ_A v točki A:

$$\theta_A l(1 - a) = \theta a l$$

$$\theta_A = \frac{\theta a l}{l(1 - a)} = \theta \frac{a}{(1 - a)}$$

Enačba virtualnega dela $\delta_{zun} = \delta_{not}$:

$$ql \left(\frac{\theta a l}{2} \right) = M_{pl} \theta + M_p \left(\theta + \theta \frac{a}{(1 - a)} \right)$$

$$\frac{ql^2 \theta a}{2} = M_{pl} \theta \left(\frac{2 - a}{1 - a} \right)$$

$$M_{pl} = \frac{ql^2 a(1 - a)}{2(2 - a)}$$

Največji potreben plastični moment v polju dobimo tako, da zgornji enačbi poiščemo maksimum (izpustimo vse konstantne člene, enačbo odvajamo po a in jo izenačimo z 0):

$$\frac{dM_{pl}}{da} = 0$$

$$\frac{(2 - a)(1 - 2a) - (a - a^2)(-1)}{(2 - a)^2} = 0$$

Ker je $a \in [0,1]$, lahko desno stran pomnožimo z $(2 - a)^2$, ne da bi pri tem izgubili kakšno rešitev:

$$a^2 - 4a + 2 = 0$$

$$a = \frac{4 \pm \sqrt{(-4)^2 - 4(1 \cdot 2)}}{2 \cdot 1}$$

$$a_1 = 3.414, a_2 = 0.586 \text{ (rešitev)}$$

Vstavimo v enačbo za M_{pl} :

$$M_{pl} = \frac{ql^2 a(1 - a)}{2(2 - a)} = \frac{ql^2 0.586(1 - 0.586)}{2(2 - 0.586)} = 0.086ql^2$$

Izbira lege

→ Izberem nosilec IPE140

$$W_{pl} = 88.4 \text{ cm}^3, W_{el} = 77.3 \text{ cm}^3, A = 16.4 \text{ cm}^2$$

$$q_{Ed} = 1.35 \cdot \left(0.5 \text{ kN/m} + \frac{16.4 \text{ cm}^2}{100^2} \cdot 78 \text{ kN/m}^3 \right) + 1.5 \cdot 4.0 \text{ kN/m} = 6.85 \text{ kN/m}$$

$$M_{pl} = 88.4 \text{ cm}^3 \cdot 27.5 \text{ kN/cm}^2 = 2431 \text{ kNcm} \geq 0.086 \cdot \frac{6.85 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot (600 \text{ cm})^2}{100} = 2120.8 \text{ kNcm} \checkmark$$

6.4.2 Karakteristična MSU

Karakteristična kombinacija obtežb za MSU:

$$1,0 \cdot g_{last} + 1,0 \cdot g_k + 1,0 \cdot s_{lin}$$

Kontrola napetosti:

ND določa, da je v primeru, ko je za projektiranje na MSN uporabljena globalna plastična analiza, potrebno opraviti kontrolo napetosti na nivoju karakteristične MSU, s katero pokažemo, da je konstrukcija v elastičnem območju. V tem primeru dokažemo, da se v MSU ne začne plastifikacija prereza.

$$\sigma_{Ed,ser} \leq f_y$$

$$\sigma_{Ed,ser} = \frac{M_{Ed}}{W_{el}} = \frac{1665 \text{ kNcm}}{77.3 \text{ cm}^3} = 21.54 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \leq 27.5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

→ Konstrukcija je v MSU v elastičnem stanju, kar pomeni, da se poškodbe ne pojavijo.

Kontrola navpičnih pomikov konstrukcije:

V SAP 2000 je izveden račun upogiba lege, ki znaša $w_{kar} = 3.68 \text{ cm}$.

Pri plastično analizirani legi je s kontrolo za MSN potreben manjši prerez nosilca, vendar se posledično zaradi nižje togosti prereza pojavijo večji upogibi.

Mejna vrednost (ND k SIST EN 1990) pri karakteristični kombinaciji za strehe nasploh:

$$\frac{L}{200} = \frac{600 \text{ cm}}{200} = 3 \text{ cm} \leq w_{kar} \quad \times$$

Kriterij upogiba na nivoju karakteristične MSU ni izpolnjen, ker ND podaja omejitev z mejno vrednostjo za karakteristično kombinacijo, ki jo je zelo težko zagotoviti. Ker je razpon polja velik, postane merodajno projektiranje na MSU. To pomeni, da se korist plastičnega projektiranja pojavi le, ko MSU niso odločilna.

Izkaže se, da je kakršnakoli omejitev upogiba lege na nivoju karakteristične MSU nepotrebna, saj je kontrola napetosti pokazala, da je lega v elastičnem stanju. To pomeni, da do poškodb lege ne pride, zato je kriterij pomikov za lego nepomemben. Ta pa je pomemben z vidika preprečevanja poškodb na lego

pripetih nekonstrukcijskih elementov (fasade, stropni in talni elementi, kritine, predelne stene, odprtine itd.). Kritina je lahko izvedena tako, da je pomembnejši relativni pomik leg (zaradi razlik v togosti med obodom in poljem strehe) in ne posamezen upogib lege, zato kriterij ni vedno relevanten. Pri zagotavljanju nepoškodovanosti predelnih sten pri večetažnih stavbah je pomembna kontrola relativnih upogibov med sosednjimi etažami in med streho in spodnjo etažo. Z vidika poškodb nekonstrukcijskih elementov je smiselno omejevati le upogibe zaradi spremenljivih vplivov in tistih stalnih obtežb, ki se pojavijo po njihovi vgraditvi. Zagotavljanje primerne videza z omejitvijo celotnega upogiba s karakteristično mejno vrednostjo je nelogično in zelo težko doseženo.

6.4.3 Pogosta MSU

Pogosta kombinacija obtežb za MSU:

$$1,0 \cdot g_{last} + 1,0 \cdot g_{k,lin} + 0.2 \cdot s_{lin}$$

Kontrola navpičnih pomikov konstrukcije:

V SAP 2000 je izveden račun upogiba lege, ki znaša $w_{pog} = 1.13$ cm.

Mejna vrednost (ND k SIST EN 1990) za karakteristično kombinacijo za strehe nasploh:

$$\frac{L}{200} = \frac{600 \text{ cm}}{200} = 3 \text{ cm} \geq w_{pog} \checkmark$$

Omejitev upogiba s karakteristično mejno vrednostjo je na nivoju pogoste MSU prelahko izpolniti.

7 ZAKLJUČEK

Slovenski standard SIST EN 1990 določa, da se kontrola mejnega stanja pomikov in vibracij izvede z ustrezno kombinacijo vplivov (karakteristična/pogosta/navidezno stalna), odvisno od tega, ali je opazovano mejno stanje povratno ali nepovratno. Pomanjkljivost ND-ja je, da se ne razjasni na kaj ciljajo omejitve pomikov. Vse našete zahteve, ki se nanašajo na MSU, združi pod isto kontrolo in podaja za vse kriterije le priporočene mejne vrednosti za karakteristično kombinacijo vplivov. Kontrola pomikov z namenom preprečitve poškodb (ne)konstrukcijskih elementov je ustrezna rešitev, a ta ne more biti enaka za vse elemente. Pri nekaterih, kontrola pomikov služi za zagotavljanje funkcije njihovega delovanja (tesnost, izolativnost, tekoče odpiranje vrat/oken, ravnost tal itd.). Zaradi različnih zahtev je enoten kriterij pomikov, ločen samo na stropove ali strehe, neustrezen zaradi prevelikih posplošitev. Ko gre za obravnavo mejnih stanj, ki so povezana z zahtevami kot so delovanje strojev, udobje uporabnikov in nepoškodovanosti nekonstrukcijskih delov, bi bilo bolj smiselno preveriti s pogosto kombinacijo vplivov. S pogosto bi bilo potrebno preverjati tudi mejna stanja nihanj. Videz bi moral biti preverjen z navidezno stalno kombinacijo vplivov, kot navaja SIST EN 1990. Evrokod bi poleg priporočenih mejnih vrednosti za upogibe, izražene z deležem razpona, lahko predstavil tudi pripadajoče absolutne mejne vrednosti. Te so v primeru zagotavljanja nepoškodovanosti nenosilnih elementov tudi zelo pomembne.

Pri jeklenih konstrukcijah je kriterij pomikov in napetosti na nivoju karakteristične MSU za konstrukcijske elemente velikokrat nepomemben. Konstrukcija je pri tem nivoju obremenitev v elastičnem stanju, omejevanje pomikov za preprečitev poškodb konstrukcijskih delov pa tako ni potrebno. To velja, ker izkoriščamo plastično rezervo, ki so jo statično nedoločene jeklene konstrukcije sposobne izkazati. Kriterij pomikov je težko izpolnjen, zato mnogokrat postane odločilno projektiranje na MSU, prerez elementov pa se mora po nepotrebnem povečati.

Pri armiranobetonskih konstrukcijah se poškodbam nosilne konstrukcije izognemo tako, da omejimo največjo širino razpok, ki je odvisna od razreda izpostavljenosti in vrste konstrukcije. Omejimo tudi tlačne napetosti betona ter natezne napetosti klasične in prednapete armature. S temi ukrepi zagotovimo trajnost, sprejemljiv videz (glede razpokanosti) in elastično obnašanje konstrukcij. Primeren videz, zagotavljanje predvidene funkcije konstrukcije ter preprečevanje poškodb nekonstrukcijskih elementov zagotovimo z omejitvijo pomikov pri navidezno stalni kombinaciji vplivov. Račun povesa vključuje vpliv razpok, lezenja in krčenja betona. Če so v celotnem elementu natezne napetosti betona manjše od njegove natezne trdnosti, se privzame, da je element nerazpokan. Drugače se obnašanje elementa umesti med obnašanje nerazpokanega in popolnoma razpokanega prereza [1].

Preseganje mejnih stanj uporabnosti je večkrat stvar inženirske presoje. Tako določitev željenih uporabnostnih zahtev kot njihova smiselna vključitev v kriterije, se razlikujeta od gradbenega projekta do projekta. Vsak naročnik ima drugačna pričakovanja glede načrtovanega objekta, zato je primerno, da se področje mejnih stanj uporabnosti ne sistematizira v toge okvire standardov. To ne pomeni, da so manj pomembna. Samo z njimi lahko zagotovimo kakovostno bivanjsko in delovno okolje, ki omogoča izvajanje vseh prvotno predvidenih dejavnosti v stavbi [3].

VIRI

- [1] Lopatič, J., 2016/2017, Študijsko gradivo, Betonske konstrukcije 2. del, str. 115-178.
- [2] SIST EN 1990: 2004/A101 - Evrokod: Osnove projektiranja - Nacionalni dodatek.
- [3] West, M., Fisher, J., Griffis, L.G. 2003. Steel Design Guide 3. Serviceability Design Considerations for Steel Buildings. Second edition. American Institute of Steel Construction, Inc.: 50 str.
- [4] SIST EN 1990: 2004 - Evrokod: Osnove projektiranja.
- [5] Honfi, D. 2013. Design for Serviceability - A probabilistic approach. Lund University, str. 26-45.
- [6] SIST EN 1993-2: 2007 - Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij – 2. del: Mostovi.
- [7] Gulvanessian, H., Calgaro, J.-A., Holický, M. 2012. Designers' Guide to Eurocode: Basis of Structural Design EN 1990. Second edition. London. ICE Publishing: 190 str.
- [8] SIST EN 1993-1-1: 2005 Evrokod 3: Projektiranje jeklenih konstrukcij-1-1. del: Splošna pravila in pravila za stavbe.
- [9] Može, P. 2016/2017a. Predavanja pri predmetu Jeklene konstrukcije – B I. Varnost in zanesljivost konstrukcij.
- [10] Caprani, C. 2009/10. Plastic Analysis 3rd Year Structural Engineering: 116 str.
<https://www.researchgate.net/publication/242526289> (Pridobljeno 8. 7. 2017.)
- [11] Može, P. 2016/2017b. Predavanja pri predmetu Jeklene konstrukcije – B I. Prečni prerezi, str. 1-9.
- [12] ISO 10137: 2007. Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibrations.

Ostali viri:

SIST EN 1991: Evrokod 1 – Vplivi na konstrukcije.

Beg, D. (ur.), Pogačnik, A. (ur.). 2009. Priročnik za projektiranje gradbenih konstrukcij po evrokod standardih. Ljubljana, Inženirska zbornica Slovenije: 1077 str.