

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

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



Univerzitetni študij gradbeništva,
Konstrukcijska smer

Kandidat:

Tomaž Tušar

Simulacija padca armiranobetonskega zabojnika na togo podlago

Diplomska naloga št.: 3107

Mentor:

izr. prof. dr. Boštjan Brank

Somentor:

dr. Jaka Dujc

Ljubljana, 2010

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani TOMAŽ TUŠAR izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom: "SIMULACIJA PADCA ARMIRANOBETONSKEGA ZABOJNIKA NA TOGO PODLAGO".

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

Ljubljana, 17. 3. 2010

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 519.61/.64:624.012.45(043.2)
Avtor: Tomaž Tušar
Mentor: izr. prof. dr. Boštjan Brank
Somentor: univ. dipl. inž. grad. Jaka Dujc
Naslov: Simulacija padca armiranobetonskega zabojnika na togo podlago
Obseg in oprema: 59 str., 71 sl.
Ključne besede: metoda končnih elementov, eksplicitna dinamika, padec armirano-
betonskega telesa

Izvleček

Diplomska naloga obravnava simulacijo padca armiranobetonskega zabojnika na togo podlago. Za izvedbo simulacije je bil uporabljen računalniški program Abaqus, ki izvaja analize po metodi končnih elementov. Način analize, ki smo ga uporabili, je eksplicitna dinamika. Kako se modelira armiranobetonske konstrukcije s programom Abaqus, smo spoznali na preprostem primeru stene obremenjene s strižno silo. Izračunali smo več različnih primerov, pri katerih smo spreminjali razmak in prerez armaturnih palic ter pozicijo armature. Na teh primerih smo tudi preverili, kako na končne rezultate vpliva hitrost nanosa obtežbe. Nadalje smo pripravili preprost modela zabojnika, s katerim smo naredili prve simulacije padca. S spreminjanjem tega modela smo poskušali čimbolj zmanjšati velikosti numeričnih napak. Znanje, pridobljeno z analiziranjem stene in preprostega zabojnika, smo nato uporabili pri pripravi natančnejšega modela, kjer smo posebej modelirali zunanje armiranobetonske stene zabojnika in njegovo notranjost, kjer naj bi bil skladiščen odpaden radioaktiven material. Tako smo dobili rezultate o razširjenosti in stopnji poškodovanosti armiranobetonskih sten zabojnika po padcu, kar je bil osnovni cilj naloge.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 519.61/.64:624.012.45(043.2)
Author: Tomaž Tušar
Supervisor: Boštjan Brank, assoc. prof.
Cosupervisor: Jaka Dujc, CE
Title: Impact simulation of reinforced concrete container
Notes: 59 p., 71 fig.
Key words: finite element method, explicit dynamics, reinforced concrete body impact

Abstract

In this work we present simulation of a drop of a reinforced concrete container. Analysis was done by a finite element computer code Abaqus. The type of analysis was explicit dynamics. In order to understand modeling of reinforced concrete structures in Abaqus, several tests were performed on a simple wall under shear load. In these tests the area of reinforcing bars, the distance between the bars and the position of the bars in the wall were varied. The influence of the velocity of the load on results was tested too. In the next step, impact simulations were done on a simple model of the container. This model was optimizer with respect to the numerical error. Finally, the knowledge obtained on simple tests was used to prepare a detailed model of a container, with the reinforced concrete walls modeled in a different way from its interior; the later is meant as a disposal volume for a radioactive material. By performing analyses on a detailed model, we obtained data of the level of damage of the reinforced concrete walls, which was the main goal of this work.

ZAHVALA

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Boštjanu Branku in somentorju univ. dipl. inž. grad. Jaki Dujcu.

Zahvala gre tudi vsej družini za pomoč in podporo v času izdelave naloge ter celotnem času študija.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	EKSPLICITNA DINAMIKA	2
2.1	Račun hitrosti in pomikov	2
2.2	Stabilnost problema	3
3	MODELIRANJE ARMIRANOBETONSKIH KONSTRUKCIJ V RAČUNAL- NIŠKEM PROGRAMU ABAQUS	4
3.1	Materialni model betona	4
3.2	Modeliranje strižno obremenjene armiranobetonske stene	6
3.3	Primerjava pomikov vrha stene glede na način nanosa obtežbe	9
3.4	Primerjava pomikov vrha stene glede na razmak med armaturnimi palicami	14
3.5	Primerjava pomikov vrha stene glede na velikost prereza armaturnih palic .	18
3.6	Primerjava pomikov vrha stene glede na pozicijo armature	20
4	PADEC ARMIRANOBETONSKEGA ZABOJNIKA	23
4.1	Preprost model zabojnika	26
4.1.1	Modeliranje osnovnega preprostega modela zabojnika	26
4.1.2	Modeliranje zabojnika s porezanimi robovi	34
4.1.3	Modeliranje zabojnika z začetno hitrostjo	40
4.2	Natančen model zabojnika	48
4.2.1	Betonski model zabojnika	49
4.2.2	Armiranobetonski model zabojnika	52
5	ZAKJUČEK	57
	VIRI	59

KAZALO SLIK

Slika 1:	Določitev materialnega modela betona	5
Slika 2:	Utrjevanje in mehčanje betona v tlaku.	6
Slika 3:	Obnašanje betona v nategu po nastanku razpoke.	6
Slika 4:	Odnos med poškodovanostjo in ekvivalentno plastično deformacijo v tlaku.	7
Slika 5:	Odnos med poškodovanostjo in širino razpoke v nategu.	7
Slika 6:	Togo vpeta stena, ki je obremenjena s strižno silo	8
Slika 7:	Pomik vrha osnovnega modela stene.	10
Slika 8:	Določitev nanosa obtežbe v enako velikih prirastkih.	11
Slika 9:	Pomik vrha stene pri nanosu obežbe v enako velikih prirastkih.	11
Slika 10:	Primer nanosa obtežbe v gladkih korakih.	12
Slika 11:	Pomik vrha stene pri nanosu obtežbe v gladkih korakih.	13
Slika 12:	Primerjava pomikov armiranobetonske stene glede na način nanosa obtežbe.	14
Slika 13:	Primerjava pomikov jeklene stene glede na način nanosa obtežbe.	15
Slika 14:	Določitev armature v izbrani ploskvi.	16
Slika 15:	Pomik vrha stene armirane s palicami prereza $0,5 \text{ cm}^2$ na razdalji 10 cm.	16
Slika 16:	Pomik vrha stene armirane s palicami prereza $0,5 \text{ cm}^2$ na razdalji 2,5 cm.	17
Slika 17:	Primerjava pomikov armiranobetonske stene glede na razmak armaturnih palic.	17
Slika 18:	Pomik vrha stene armirane s palicami prereza 1 cm^2 na razdalji 5 cm.	18
Slika 19:	Pomik vrha stene armirane s palicami prereza $0,25 \text{ cm}^2$ na razdalji 5 cm.	19
Slika 20:	Primerjava pomikov vrha armiranobetonske stene glede na količino in razmak armature.	20
Slika 21:	Pomik vrha stene pri postavitvi armature samo na tlačeni strani stene.	21
Slika 22:	Pomik vrha stene pri postavitvi armature na natezni in tlačeni strani stene.	22
Slika 23:	Primerjava pomikov vrha armiranobetonske stene glede na pozicijo armature (krivulji osnovnega in tretjega primera se prekrivata).	22
Slika 24:	Armiranobetonski zabojniki za skladiščenje radioaktivnih odpadkov.	23
Slika 25:	Tloris zabojnika zgoraj.	24
Slika 26:	Tloris zabojnika spodaj.	24
Slika 27:	Prerez zabojnika.	25
Slika 28:	Detajl stika pokrova in stene zabojnika.	25
Slika 29:	Model zabojnika namestimo 30 cm nad togo podlago.	27

Slika 30:	Razdelitev zabojnika na končne elemente.	28
Slika 31:	Začetni položaj zabojnika.	29
Slika 32:	Položaj zabojnika v času $t = 1$ s.	29
Slika 33:	Položaj zabojnika v času $t = 2$ s.	30
Slika 34:	Položaj zabojnika v času $t = 3$ s.	30
Slika 35:	Navpični pomik vogalne točke u_3	31
Slika 36:	Graf kinetične energije (ALLKE).	32
Slika 37:	Graf energije, ki se disipira zaradi poškodovanosti materiala (ALLDMD).	32
Slika 38:	Poškodovanost zabojnika po padcu (rdeče je obarvan popolnoma poškodovan material).	33
Slika 39:	Graf notranje energije zabojnika (ALLIE) z energijami, ki jo sestavljajo.	34
Slika 40:	Zabojnik razdelimo na štirivozliščne tetraedrične končne elemente.	35
Slika 41:	Začetni položaj zabojnika.	36
Slika 42:	Položaj zabojnika v času $t = 0,5$ s.	36
Slika 43:	Položaj zabojnika v času $t = 2$ s.	37
Slika 44:	Položaj zabojnika v času $t = 3$ s.	37
Slika 45:	Navpični pomik vogalne točke u_3	38
Slika 46:	Poškodovanost zabojnika po padcu (rdeče je obarvan popolnoma poškodovan material).	38
Slika 47:	Primerjava nerealnih energij (rdeča - osnovni model, modra - model s porezanimi robovi).	39
Slika 48:	Primerjava kinetičnih energij (rdeča - osnovni model, modra - model s porezanimi robovi).	40
Slika 49:	Primerjava energij, ki se disipirajo zaradi poškodovanosti materiala (rdeča - osnovni model, modra - model s porezanimi robovi).	41
Slika 50:	Primerjava zunanjšega dela (rdeča - osnovni model, modra - model s porezanimi robovi).	42
Slika 51:	Prikaz poškodovanosti osnovnega modela - prerez zabojnika 0,5 m nad togo podlago.	42
Slika 52:	Prikaz poškodovanosti modela s porezanimi robovi - prerez zabojnika 0,5 m nad togo podlago.	43
Slika 53:	Začetni položaj zabojnika.	43
Slika 54:	Položaj zabojnika v času $t = 1$ s.	44
Slika 55:	Položaj zabojnika v času $t = 2$ s.	44
Slika 56:	Položaj zabojnika v času $t = 3$ s.	45

Slika 57:	Primerjava notranjih energij (modra - padec z višine, zelena - začetna hitrost).	46
Slika 58:	Primerjava energij, ki se disipirajo zaradi poškodovanosti materiala (modra - padec z višine, zelena - začetna hitrost).	46
Slika 59:	Primerjava zunanjega dela (modra - padec z višine, zelena - začetna hitrost).	47
Slika 60:	Primerjava nerealnih energij (modra - padec z višine, zelena - začetna hitrost).	47
Slika 61:	Prikaz poškodovanosti modela z začetno hitrostjo - prerez zabojnika 0,5m nad togo podlago.	48
Slika 62:	Gosta mreža končnih elementov.	50
Slika 63:	Poškodovanost betonskega zabojnika.	50
Slika 64:	Detajl poškodovanega vogala.	51
Slika 65:	Notranjost zabojnika je nepoškodovana.	51
Slika 66:	Notranja energija zabojnika z energijami, ki jo sestavljajo.	52
Slika 67:	Poškodovanost armiranobetonskega zabojnika.	53
Slika 68:	Detajl poškodovanega vogala.	54
Slika 69:	Notranjost zabojnika se poškoduje.	54
Slika 70:	Notranja energija zabojnika in energije, ki jo sestavljajo.	55
Slika 71:	Primerjava zunanjega dela (modra - betonski zabojnik, rdeča - AB zabojnik).	56

1 UVOD

V gradbeništvu se za analizo konstrukcij in drugih problemov uporablja računalniške simulacije. Te so veliko krajše in cenejše kot testiranje dejanskih modelov. Za izvedbo simulacij potrebujemo računalnik in računalniški program, ki omogoča modeliranje problema z uporabo metode končnih elementov. S programom v kratkem času naredimo model in morebitne spremembe so preprosto izvedljive.

V diplomski nalogi bomo izvedli simulacijo padca armiranobetonskega zabojnika za shranjevanje radioaktivnih odpadkov na togo podlago. Zabojnik je narejen iz armiranobetonskih sten, zaprt pa z armiranobetonskim pokrovom. Vanj se položi radioaktivne odpadke v kovinskih posodah, potem se pokrije s pokrovom in nazadnje zapolni z malto. Za modeliranje problema bomo uporabili komercialni računalniški program Abaqus. Uporabili bomo eksplicitno dinamično analizo, ki je najpogosteje uporabljena metoda za simulacijo trkov deformabilnih teles.

Pri modeliranju zabojnika bomo uporabili armaturo. Podajanja armature v računalniškem programu se bomo naučili na preprostem primeru stene obremenjene s strižno silo. Naredili bomo več različnih modelov stene, kjer bomo spreminjali način nanosa obtežbe, količino in pozicijo armature. Sledilo bo modeliranje preprostega modela zabojnika. Na modelu bomo preverili kako na trk zabojnika vplivajo geometrija, oblika in število končnih elementov. Poiskali bomo način kako čim bolj skrajšati trajanje računa simulacije. Primerjava rezultatov osnovnega modela s spremenjenimi bo pokazala kako spremembe vplivajo na trk zabojnika. V primeru dobrih rezultatov bomo spremembe vključili v natančen model zabojnika, v nasprotnem primeru pa jih izločili iz nadaljnih simulacij. V zadnjem delu naloge bomo naredili natančen model zabojnika. Tu bomo posebej modelirali betonski del zabojnika in njegovo vsebino. Modelirali bomo betonski zabojnik in nato še armiranobetonskega in primerjali dobljene rezultate.

2 EKSPLICITNA DINAMIKA

Eksplisitna dinamika je tip analize, pri kateri se upošteva inercialne sile in časovno spremenljivo obtežbo, integracija navadnih diferencialnih enačb po času pa poteka na eksplisiten način. Ta vrsta analize je standardna pri računalniškem računu trkov deformabilnih teles. Pravilo eksplisitne integracije je enostavno, a računsko zahtevnejše od procedure eksplisitne dinamike. Ta je računsko manj zahtevna zaradi uporabe diagonalne masne matrike. Rešiti je potrebno naslednjo enačbo:

$$[M]\ddot{u}(t) + [I(t)] = [F(t)], \quad (1)$$

kjer $[M]$ predstavlja diagonalno masno matriko, $[I(t)]$ vektor notranjih sil in $[F(t)]$ vektor zunanjih sil (obtežbe). Pospešek \ddot{u} izračunamo po naslednji enačbi:

$$\ddot{u}^{(i)} = M^{-1}(F^{(i)} - I^{(i)}) \quad (2)$$

2.1 Račun hitrosti in pomikov

Iščemo rešitve za vrednosti hitrosti \dot{u} in pomikov u v časih t_0, t_1, \dots, t_n . Do njih pridemo preko naslednjega postopka:

$$\dot{u}^{(i+\frac{1}{2})} = \dot{u}^{(i-\frac{1}{2})} + \frac{\Delta t^{(i+1)} + \Delta t^{(i)}}{2} \ddot{u}^{(i)} \quad (3)$$

$$u^{(i+1)} = u^{(i)} + \Delta t^{(i+1)} \dot{u}^{(i+\frac{1}{2})}. \quad (4)$$

V zgornjih enačbah je $\Delta t^{(i)} = t^{(i)} - t^{(i-1)}$. Indeks (i) označuje vrednost posamezne količine v času t_i , medtem ko indeks $(i + \frac{1}{2})$ označuje vrednost količine v času $\frac{t_i + t_{i+1}}{2}$. Za izračun vrednosti pomika v koraku $i + 1$ potrebujemo vrednosti pomika iz koraka i in vrednosti hitrosti na polovici koraka. Vmesna vrednost hitrosti nam je le v pomoč pri računu pomikov, medtem ko vrednosti hitrosti v izbranih časih t_i dobimo po naslednji enačbi:

$$\dot{u}^{(i+1)} = \dot{u}^{(i+\frac{1}{2})} + \frac{1}{2} \Delta t^{(i+1)} \ddot{u}^{(i+1)}. \quad (5)$$

Za zagon postopka je potrebno definirati srednjo vrednost hitrosti $\dot{u}^{(-\frac{1}{2})}$. Začetni vrednosti pospeška in hitrosti pri času $t = 0$ moramo predpisati, v nasprotnem primeru je njuna vrednost 0. Zahtevamo naslednje stanje:

$$\dot{u}^{(+\frac{1}{2})} = \dot{u}^{(0)} + \frac{\Delta t^{(1)}}{2} \ddot{u}^{(0)}. \quad (6)$$

To enačbo vnesemo v enačbo 3 in dobimo naslednjo enačbo za $\dot{u}^{(-\frac{1}{2})}$:

$$\dot{u}^{(-\frac{1}{2})} = \dot{u}^{(0)} - \frac{\Delta t^{(0)}}{2} \ddot{u}^{(0)}. \quad (7)$$

2.2 Stabilnost problema

Eksplisitna procedura integrira po času z uporabo majhnih časovnih prirastkov. Centralni operator razlike je pogojno stabilen in meja stabilnosti operatorja je podana v povezavi z najvišjo lastno frekvenco ω_{\max} kot:

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{\max}}. \quad (8)$$

Upošteva se tudi minimalno dušenje, zaradi kontroliranega obnašanja nihanja višjih frekvenc. V tem primeru izračunamo Δt po naslednji formuli:

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{\max}} \left(\sqrt{1 + \xi^2} - \xi \right), \quad (9)$$

kjer je ξ je delež kritičnega dušenja najvišje nihajne oblike. Za vsak končni element se izračuna stabilni prirastek časa po naslednji enačbi:

$$\Delta t = \frac{2}{\omega_{\max}^{\text{element}}}, \quad (10)$$

kjer $\omega_{\max}^{\text{element}}$ predstavlja največjo lastno frekvenco. Za konzervativno oceno stabilnega prirastka časa vzamemo minimalno vrednost izračunano po zgornji enačbi za vsak končni element. Enačbo lahko zapišemo tudi kot:

$$\Delta t = \min \left(\frac{L_e}{c_d} \right), \quad (11)$$

kjer je L_e karakteristična dimenzija elementa in c_d hitrost valovanja v materialu. Slednjo izračunamo na sledeči način:

$$c_d = \sqrt{\frac{\widehat{\lambda} + 2\widehat{\mu}}{\rho}} \quad (12)$$

kjer sta $\widehat{\lambda}$ in $\widehat{\mu}$ Lamjevi konstanti, ρ pa gostota materiala.

3 MODELIRANJE ARMIRANOBETONSKIH KONSTRUKCIJ V RAČUNALNIŠKEM PROGRAMU ABAQUS

Abaqus je komercialni računalniški program, primeren za izvajanje analiz s končnimi elementi. Sam program je razdeljen na več modulov. V posameznih modulih podamo geometrijo, materialne lastnosti, obtežbo, razdelitev na končne elemente in tako po korakih opišemo celoten problem ter ustvarimo model za izvedbo simulacije. Armiranobetonske konstrukcije se lahko modelira na dva načina: lahko vpišemo potrebne parametre v vhodno datoteko ali v konstrukcijo vstavimo ploskev, ki vsebuje armaturo. Pri prvem načinu v vhodno datoteko, s pomočjo urejevalnika besedil, vnesemo koordinate, velikost in razmak armaturnih palic. Ob zagonu datoteke, se v programu Abaqus ustvari model konstrukcije, ki vsebuje armaturo na izbranem mestu. Pri drugem načinu v programu narišemo ploskev izbranih dimenzij in v njej določimo vrednosti armature. Nato ploskev vstavimo v konstrukcijo na izbrano mesto. V nalogi smo uporabili drugi način, ki bo v nadaljevanju podrobneje opisan.

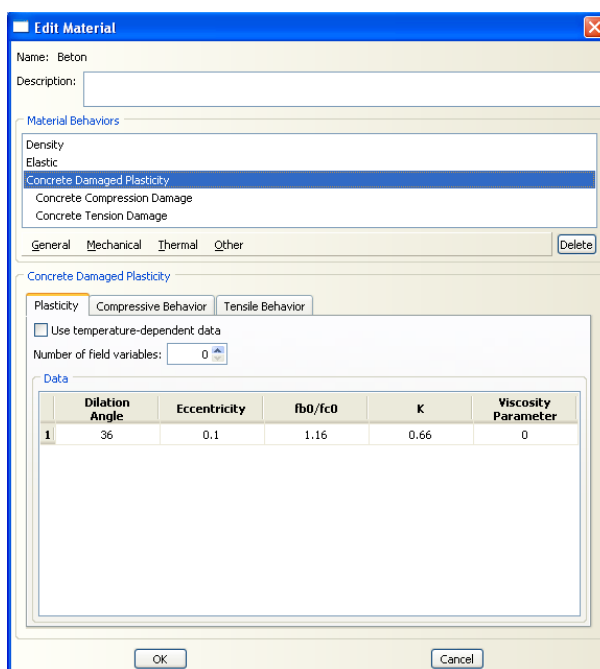
3.1 Materialni model betona

Beton opišemo z elasto-plastičnim modelom, ki je v programu Abaqus opisan kot *Concrete Damaged Plasticity*. Izbrani model upošteva poškodbe (krušenje v tlaku in razpoke v nategu), ki nastanejo med obremenjevanjem. Predpostavljena specifična teža betona je $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$. Za elastično obnašanje materiala predpostavimo elastični modul $E = 3200 \text{ kN/cm}^2$ in Poissonov količnik $\nu = 0,2$. Za opis meje tečenja v tlaku, meje tečenja v nategu (razpokanost) in tok plastičnih deformacij v tlaku in nategu se za uporabljeni model betona uporabljajo naslednji materialni parametri:

- Dilatacijski kot ψ v p-q ravnini (p je hidrostatični pritisk v materialu, q pa je von Misesova primerjalna napetost).
- Ekscentričnost plastičnega toka ϵ .

- Začetno razmerje med napetostjo tečenja pri dvoosnem tlačnem napetostnem stanju in napetostjo pri meji tečenja pri enoosnem tlačnem napetostnem stanju $\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}}$.
- Razmerje, ki določa razliko med mejo tečenja v tlaku in mejo tečenja v nategu K_c .
- Koeficient viskoznosti materiala μ .

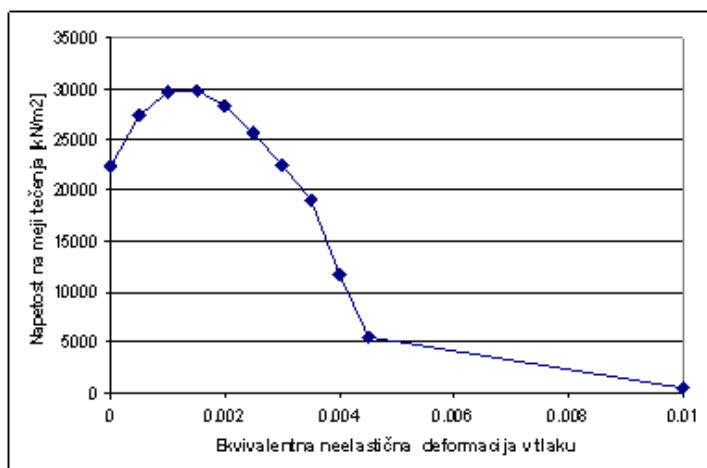
Za navedene količine smo privzeli vrednosti, ki jih program Abaqus ponuja kot standardne: $\psi = 36^\circ$, $\epsilon = 0,1$, $\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}} = 1,16$, $K_c = \frac{2}{3}$ in $\mu = 0$. Podajanje izbranih vrednosti v računalniškem programu je prikazano na sliki 1.



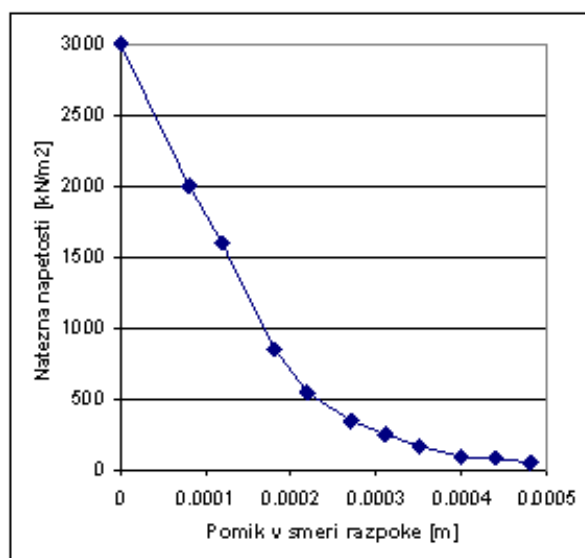
Slika 1: Določitev materialnega modela betona

Predpostavljeno utrjevanje in mehčanje materiala v tlaku je prikazano na sliki 2. Krivulja kaže odvisnost med napetostjo na meji tečenja v tlaku in ekvivalentno neelastično deformacijo v tlaku. Obnašanje materiala v nategu predstavlja slika 3, ki prikazuje natezno napetost v smeri pravokotno na razpoko v odvisnosti od pomika na mestu razpoke. Privzamemo, da je pomik na mestu razpoke enak širini razpoke.

Uporabljeni model oceni tudi poškodovanost betona v tlaku in nategu, kar se upošteva pri redukciji elastičnega modula betona in posledično redukciji togosti materiala. Predpostavljena odvisnost poškodovanosti od ekvivalentnih neelastičnih deformacij v tlaku in nategu je prikazana



Slika 2: Utrjevanje in mehčanje betona v tlaku.

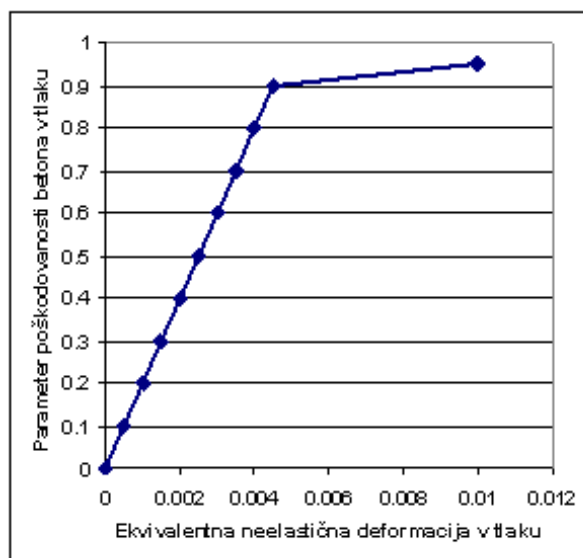


Slika 3: Obnašanje betona v nategu po nastanku razpoke.

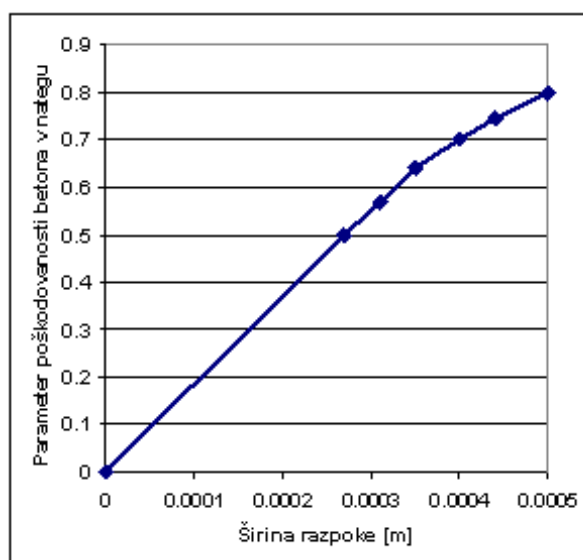
na slikah 4 in 5. Vrednost 0 predstavlja nepoškodovan material, 1 pa popolnoma poškodovan material.

3.2 Modeliranje strižno obremenjene armiranobetonske stene

Za prikaz modeliranja armiranobetonske konstrukcije s programom Abaqus smo izbrali preprosto model stene strižno obremenjene na vrhu. V program najprej vnesemo dimenzije stene. Betonska stena je 3 m visoka, 2 m široka in 0,3 m debela. Sledi definiranje plasti z jekleno arma-



Slika 4: Odnos med poškodovanostjo in ekvivalentno plastično deformacijo v tlaku.

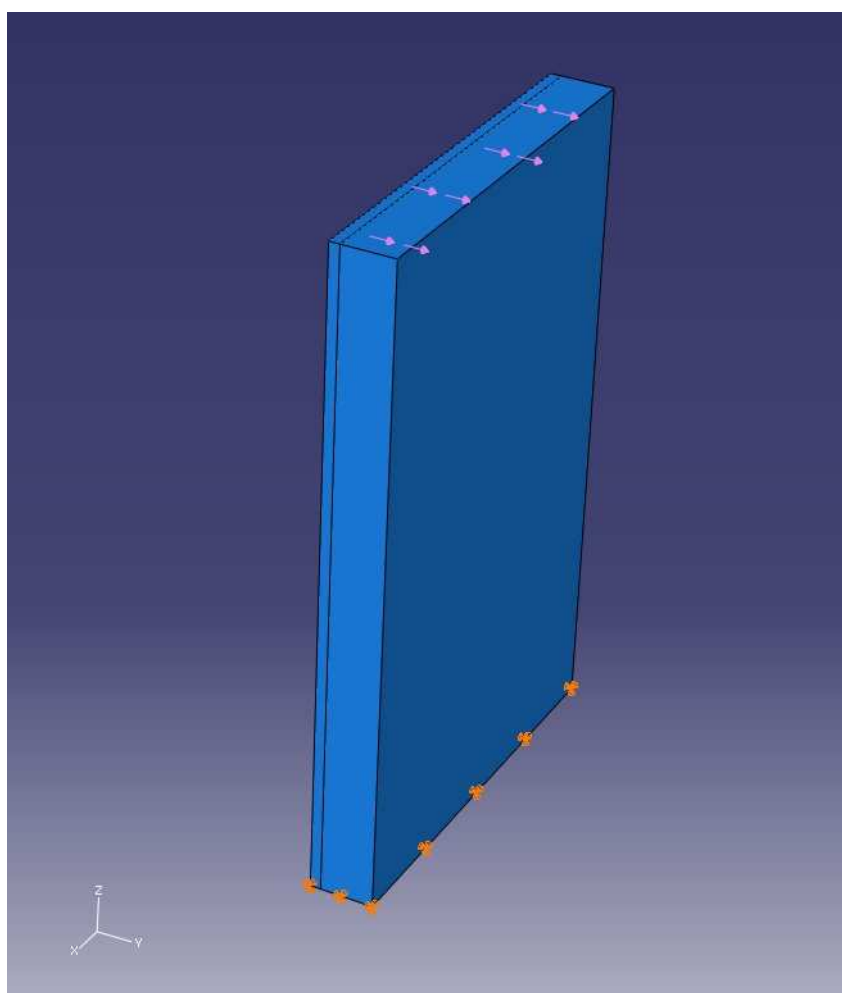


Slika 5: Odnos med poškodovanostjo in širino razpoke v nategu.

turo. Za jeklo uporabimo bilinearen delovni diagram brez utrjevanja. Predpostavimo naslednje parametre: specifična teža $\gamma = 78 \text{ kN/m}^3$, elastični modul $E = 21000 \text{ kN/cm}^2$ in Poissonov količnik $\nu = 0,3$. Za plastični del diagrama je potrebno podati mejo plastičnosti, ki v našem primeru znaša 40 kN/cm^2 . Ploskev ima enake dimenzije kot stena, v višino meri 3 m, v širino 2 m, debela pa je 0,5 mm. Tako majhno vrednost predpostavimo zato, da del ploskve, ki ne predstavlja jeklene ojačitve, ne vpliva na togost stene. Začetna armatura znaša $10 \text{ cm}^2/\text{m}$ in poteka v dveh pravokotnih smereh vzporednih z robovoma ploskve. Armaturo se v programu Abaqus poda tako, da izberemo material, površino posamezne armaturne palice, razdaljo med

palicami ter na koncu še orientacijski kot glede na x os lokalnega koordinatnega sistema. V našem primeru izberemo armaturne palice prereza $0,5 \text{ cm}^2$ postavljene na medsebojni razdalji 5 cm. Tako armirana stena bo naš osnovni primer in vsi ostali primeri bodo izpeljani iz tega primera.

Sedaj, ko imamo vse dele konstrukcije, jih moramo sestaviti. Ploskev z armaturo postavimo 5 cm od roba stene. V steno jo vključimo z ukazom *Embedded region*, kar zagotavlja povezavo med betonsko steno in jekleno ojačitvijo. Ukaz deluje tako, da najprej izberemo vstavljen del konstrukcije (*Embedded region*) in nato še gostiteljski del konstrukcije (*Host region*). Za slednjega izberemo kar celoten model stene. Naknadno steno še togo podpremo po celotni spodnji ploskvi in vrhno ploskev obremenimo s strižno silo 100 kN/m^2 (slika 6).



Slika 6: Togo vpeta stena, ki je obremenjena s strižno silo

Na koncu moramo steno razdeliti na končne elemente. Po višini razdelimo na 12 končnih elementov, po širini na 10 in po debelini na 4. Vozlišča končnih elementov stene in ploskve z

armaturo ne sovpadajo, vendar to ne ovira izračuna. Zdaj je potrebno le še zagnati simulacijo.

V nadaljevanju bo predstavljenih več različnih primerov obremenitve stene. V prvem delu bomo spreminjali način nanosa obtežbe, v drugem količino in razmak armature ter na koncu še samo pozicijo armature v steni.

3.3 Primerjava pomikov vrha stene glede na način nanosa obtežbe

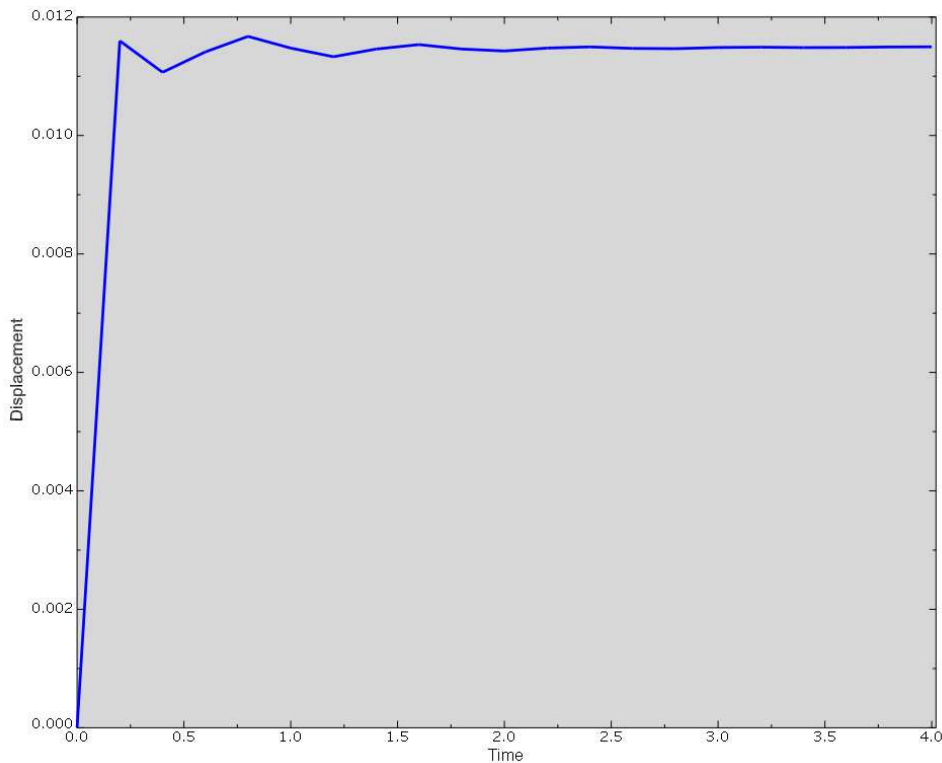
Računalniški program Abaqus ponuja več načinov nanosa obtežbe. Med ponujenimi možnostmi smo izbrali tri:

- hipni nanos (*Instantaneous*),
- nanos v enako velikih prirastkih (*Equally spaced*) in
- nanos v gladkih korakih (*Smooth step*).

V nadaljevanju bo prikazan pomik vrha stene v smeri delovanja obtežbe, pri izbranih načinih nanosa obtežbe.

Pri hipnem nanosu v trenutku obtežimo konstrukcijo s celotno obtežbo. Dinamični vpliv na konstrukcijo je večji kot pri počasnejšem nanašanju obtežbe. S slike 7 je razvidno, da pomik v začetnih desetinkah strmo narašča in se v času $t = 0,2$ s približa končnemu pomiku, okrog katerega v nadaljevanju niha. Lepo se vidi kako se amplituda nihanja s časom manjša in se pomik vedno bolj približuje končnemu pomiku, ki je v tem primeru $u_2 = 11,5$ mm.

V drugem primeru, ko obtežbo nanašamo v enako velikih prirastkih, se čas nanosa obtežbe podaljša. Vrednost obtežbe moramo podati v odstotkih za izbrani čas. Program Abaqus z linearno interpolacijo določi vrednost amplitude znotraj posameznega intervala. Predpostavimo, da je v času $t = 1$ s celotna obtežba na konstrukciji. V začetnem času $t = 0$ s je vrednost amplitude



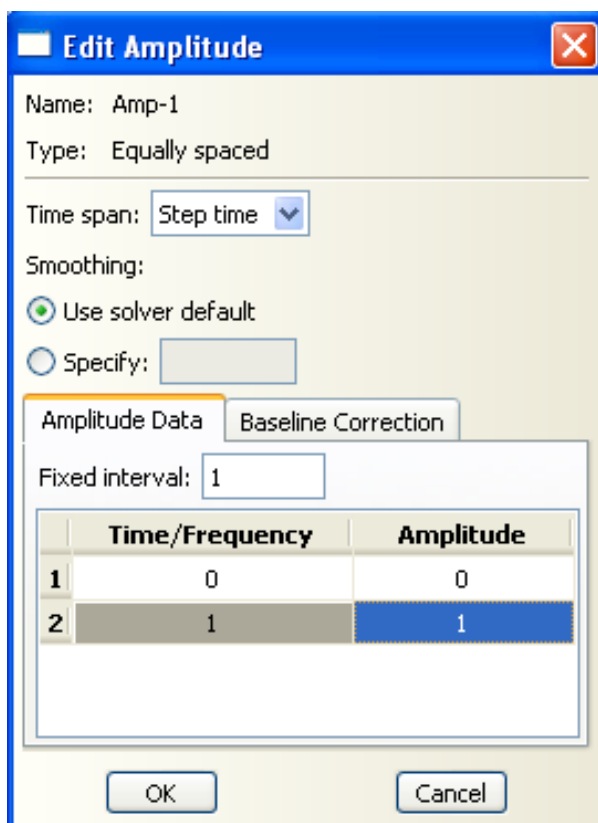
Slika 7: Pomik vrha osnovnega modela stene.

0, v času $t = 1$ s pa 1 (slika 8). V splošnem primeru lahko podamo poljubno število časovnih intervalov.

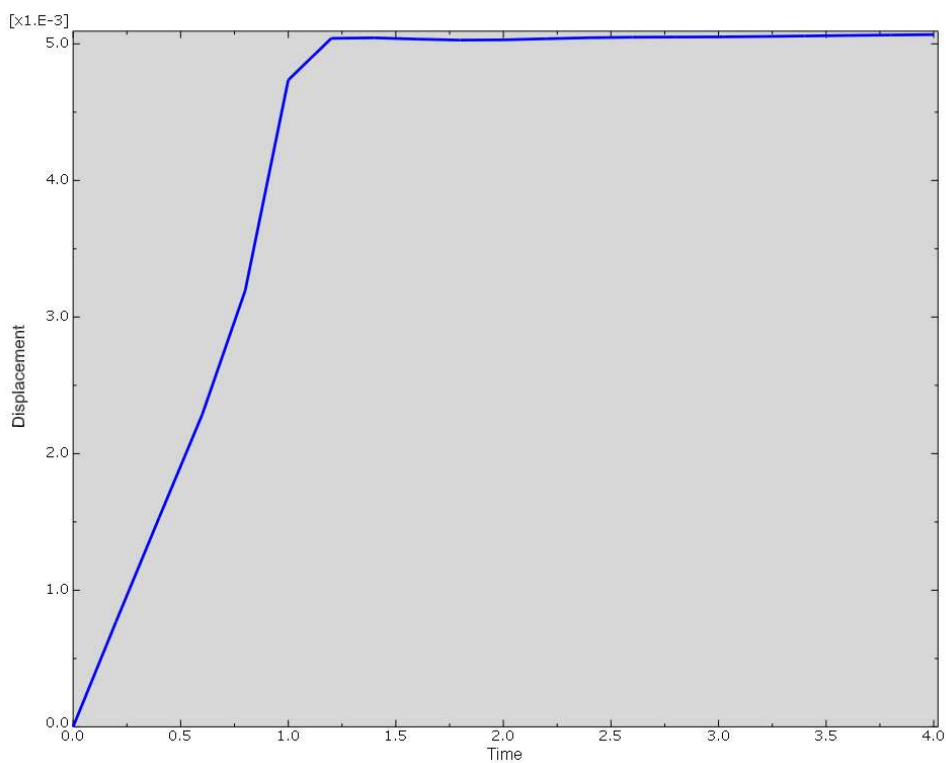
Dinamični vplivi so manjši kot pri hipnem nanosu, saj nanos obtežbe ni tako sunkovit. Razlika je opazna na grafu pomika na sliki 9. V začetku pomik narašča veliko počasneje in se v času $t = 1$ s približa končnemu pomiku $u_2 = 5,1$ mm. Tudi amplituda nihanja okrog končnega pomika je precej manjša glede na prvi primer, kar je prav tako posledica počasnejšega obremenjevanja konstrukcije.

V tretjem primeru nanesimo obtežbo v gladkih korakih. Ta primer je podoben drugemu primeru, saj na enak način podajamo vrednost amplitude obtežbe pri določenem času. Razlika je v tem kako program Abaqus računa amplitudo obtežbe znotraj časovnega intervala. Tokrat ne uporabi linearne interpolacije, temveč izračuna vrednost amplitude a med zaporednima točkama (t_i, A_i) in (t_{i+1}, A_{i+1}) po naslednji formuli:

$$a = A_i + (A_{i+1} - A_i)\zeta^3(10 - 15\zeta + 6\zeta^2) \quad \text{za } t_i \leq t \leq t_{i+1}, \quad (13)$$



Slika 8: Določitev nanosa obtežbe v enako velikih prirastkih.



Slika 9: Pomik vrha stene pri nanosu obežbe v enako velikih prirastkih.

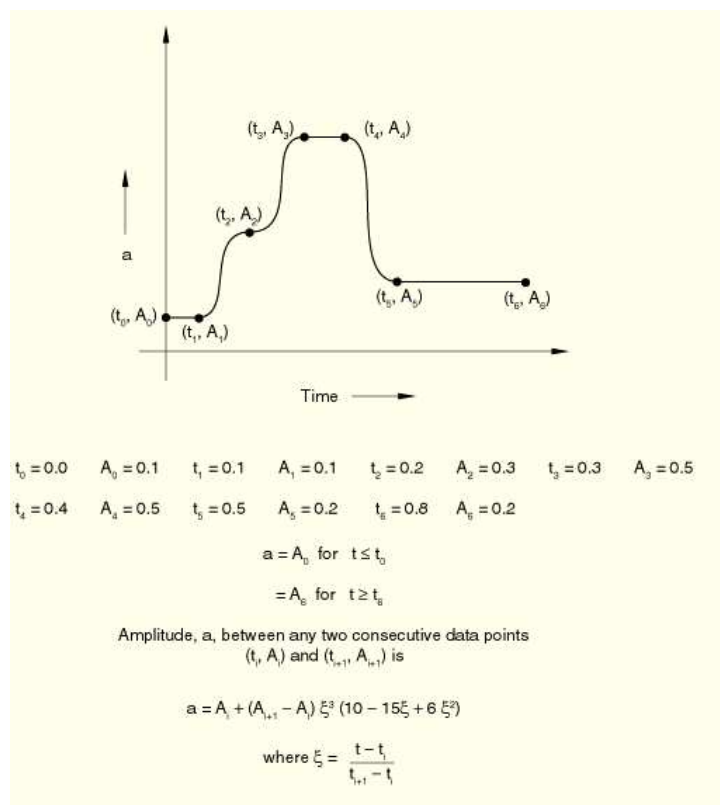
kjer je

$$\zeta = \frac{t - t_i}{t_{i+1} - t_i}.$$

Zgornja funkcija je taka, da velja $a = A_i$ v času t_i in $a = A_{i+1}$ v času t_{i+1} . Velja tudi, da sta prvi in drugi odvod funkcije a enaka 0 pri t_i in t_{i+1} . Amplituda a je definirana tako, da velja

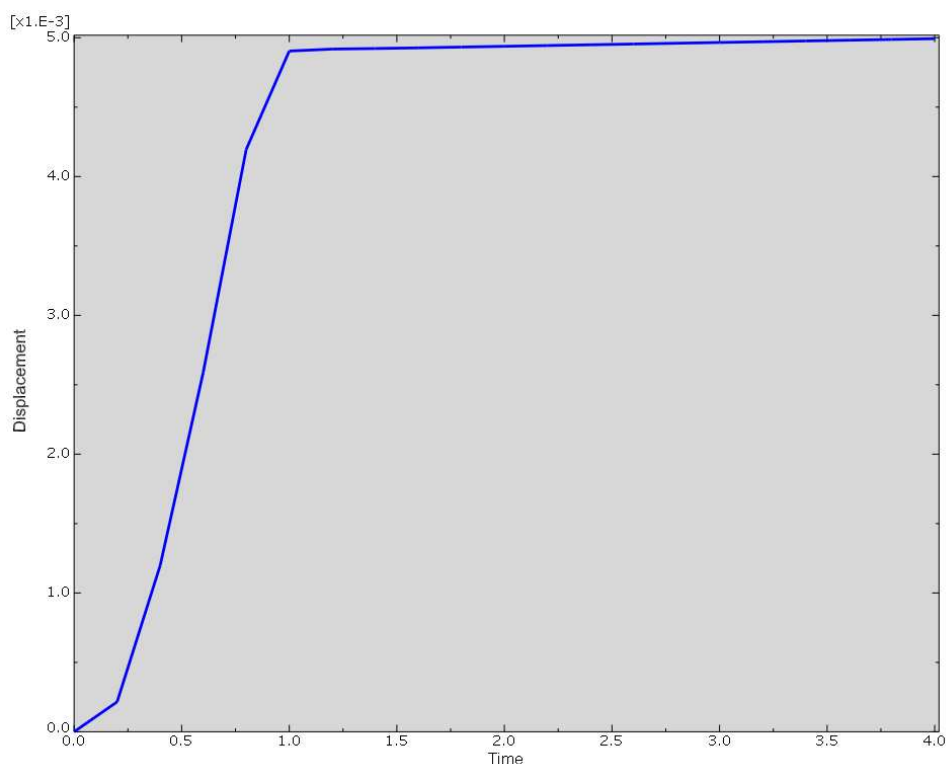
$$a = \begin{cases} A_0 & \text{za } t \leq t_0 \\ A_f & \text{za } t \geq t_f \end{cases}, \quad (14)$$

kjer je A_0 vrednost amplitude v začetnem času t_0 in A_f vrednost amplitude v končnem času t_f . Primer nanosa obtežbe v gladkih korakih je prikazan na sliki 10, kjer je podano 6 časovnih intervalov in pripadajoče vrednosti amplitude obtežbe.



Slika 10: Primer nanosa obtežbe v gladkih korakih.

V našem primeru predpostavimo en časovni interval. V času $t_0 = 0$ s je $A_0 = 0$ in v času $t_1 = 1$ s je $A_1 = 1$. V primeru enega časovnega intervala je $t_1 = t_f$. Na sliki 11 vidimo, da se pomik v času $t = 1$ s približa končnemu pomiku $u_2 = 5,0$ mm. Nihanje okrog končnega pomika stene je majhno. Neravnost grafa v prvi sekundi simulacije je posledica načina izračuna amplitude znotraj časovnega intervala.

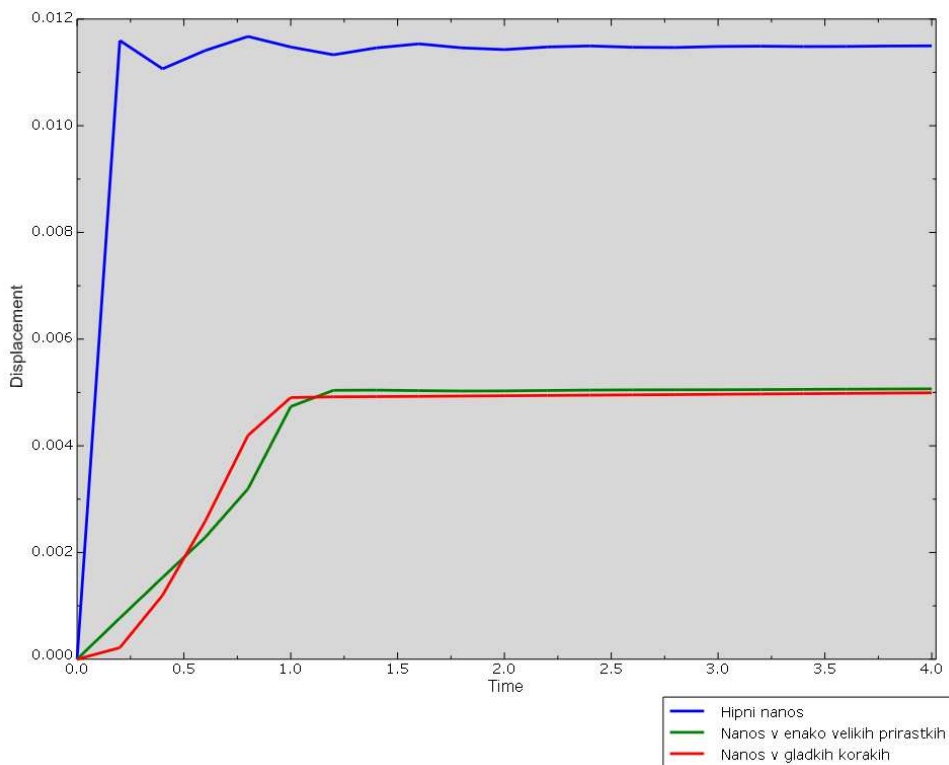


Slika 11: Pomik vrha stene pri nanosu obtežbe v gladkih korakih.

Najopaznejša razlika pri obravnavanih primerih je velikost pomika (slika 12). Do te razlike pride kljub temu, da je končna vrednost obtežbe pri vseh treh primerih enaka. Razlog tiči v načinu nanosa obtežbe in posledično v poškodovanosti materiala. V splošnem konstrukcija niha okrog statične ravnovesne lege le v primeru, ko je odziv materiala elastičen. V primeru poškodovanosti materiala tega zagotovila ni več. V prvem primeru je zaradi hipne obtežbe prišlo do večje poškodovanosti materiala in torej do večjih pomikov kot v ostalih dveh primerih.

Za primerjavo pokažimo obnašanje jeklene stene. Naši steni bomo zamenjali material, tako da bo v celoti jeklena. Tak primer sicer ni realen bo pa primeren za prikaz elastičnega odziva materiala. Končni pomik jeklene stene je $u_2 = 0,6$ mm, kar lahko prikažemo na primeru povesa konzole, ki ima enake karakteristike kot stena in sicer: $l = 3$ m, $I = 0,0045$ m⁴, $E = 210000000$ kN/m² in $F = 60$ kN.

$$w = \frac{F \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I} = \frac{60 \text{ kN} \cdot (3 \text{ m})^3}{3 \cdot 210000000 \text{ kN/m}^2 \cdot 0,0045 \text{ m}^4} = 0,00057 \text{ m} \approx 0,6 \text{ mm} \quad (15)$$

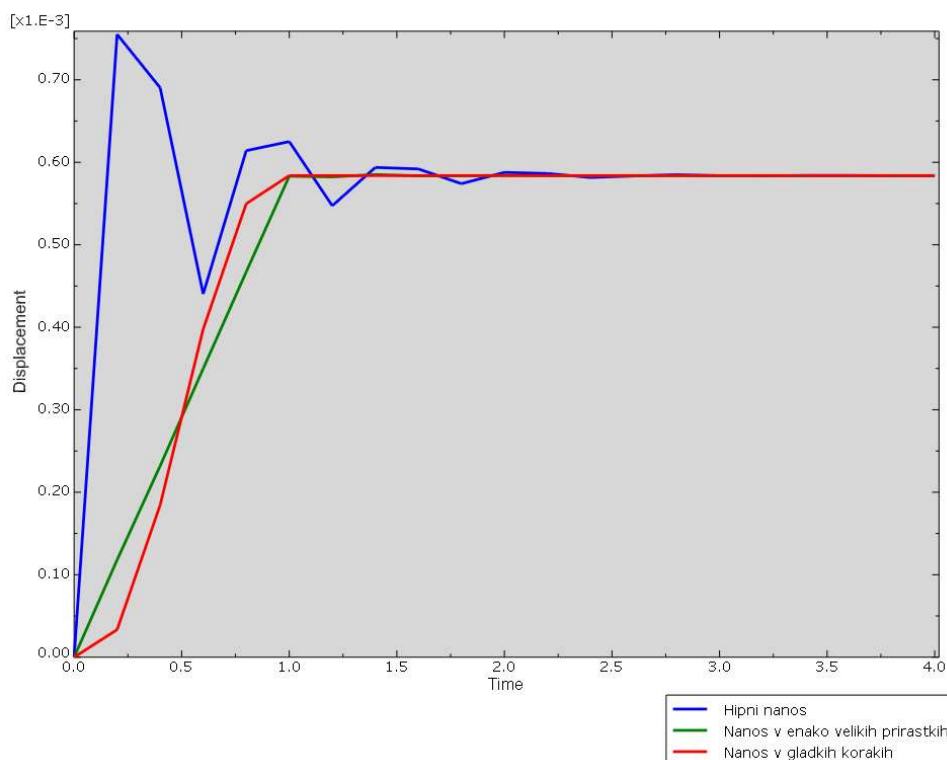


Slika 12: Primerjava pomikov armiranobetonske stene glede na način nanosa obtežbe.

Pomik je manjši od pomika betonske stene kar je razumljivo, saj je togost jeklene stene veliko večja od betonske. Na sliki 13 je razvidno, da pri vseh treh načinih nanosa obtežbe trenutni pomik niha okrog te vrednosti, saj je med obremenjevanjem material ostal v elastičnem območju. Edina razlika, ki je prisotna tudi pri betonski steni, je amplituda nihanja trenutnega pomika. Pri hipnem nanosu obtežbe, je sunek na konstrukcijo večji in zato se bolj odmakne od končnega pomika in v nadaljevanju niha okrog njega in se mu s časom približuje. Pri drugih dveh načinih je sunek manjši, kar se odrazi na velikosti amplitude.

3.4 Primerjava pomikov vrha stene glede na razmak med armaturnimi palicami

Model stene je enak kot v prejšnjem razdelku. V tem razdelku bomo spreminjali razmak med armaturnimi palicami in preverili kako vpliva na velikost pomika vrha stene. Površina armaturnih palic bo ves čas enaka. Način nanosa obtežbe bo ves čas enak in sicer hipni. Za določitev armature je potrebno podati naslednje parametre:

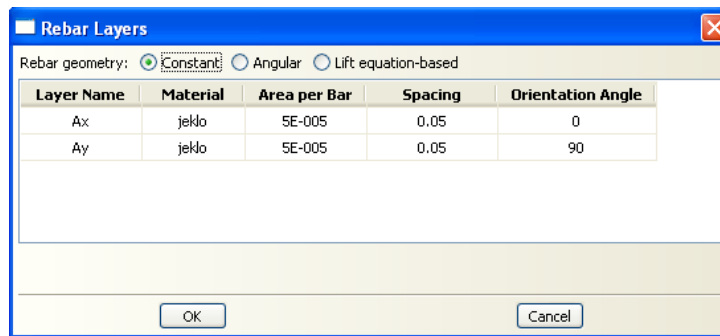


Slika 13: Primerjava pomikov jeklene stene glede na način nanosa obtežbe.

- material armaturne palice,
- presek armaturne palice,
- razdaljo med dvema armaturnima palicama in
- orientacijski kot armaturne palice glede na x os lokalnega koordinatnega sistema.

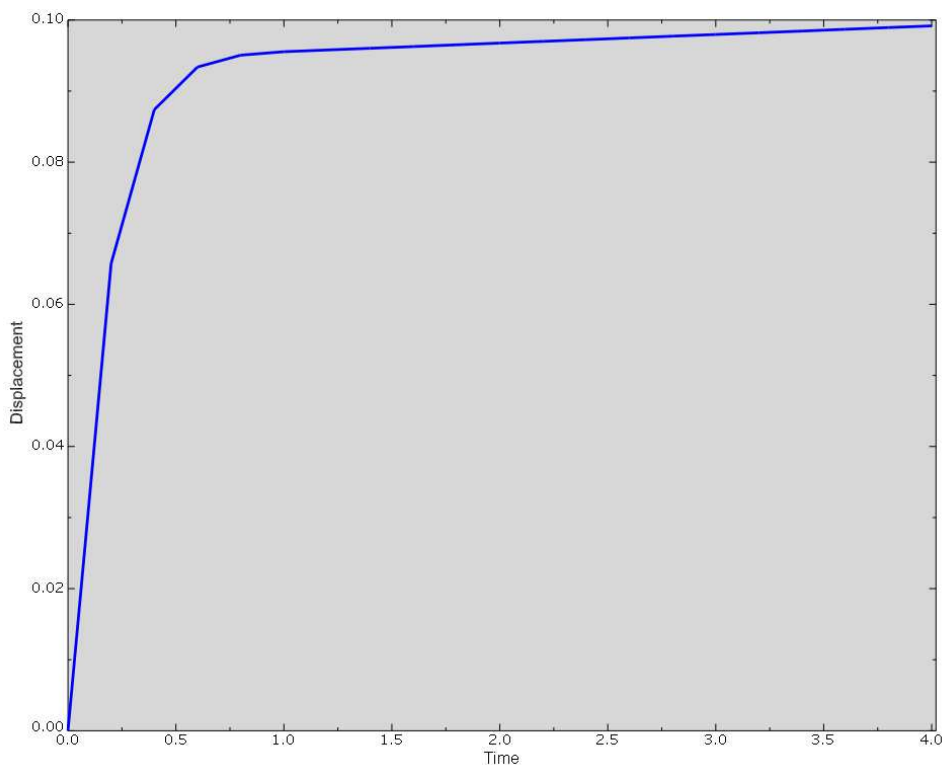
Kot osnovni primer vzamemo primer iz prejšnjega razdelka in sicer steno armirano s palicami prereza $0,5 \text{ cm}^2$ postavljenimi na razdalji 5 cm. Stena je armirana v dveh pravokotnih smereh, vzporednih z daljšima roboma stene. Količina armature je v obeh smereh enaka. Primer določitve armature v računalniškem programu je prikazan na sliki 14. Armaturne palice so postavljene 5 cm od natezne strani stene.

Razdaljo med armaturnimi palicami bomo najprej povečali na 10 cm. Pri tem, ko smo razdaljo med palicami podvojili, se je količina armature na meter dolžine stene razpolovila. Posledično pričakujemo, da se bo pomik vrha stene povečal, saj stena ni več tako toga. Na sliki 15 vidimo, da se vrh stene premakne za 99,2 mm, kar potrjuje naša pričakovanja. Krivulja pomika

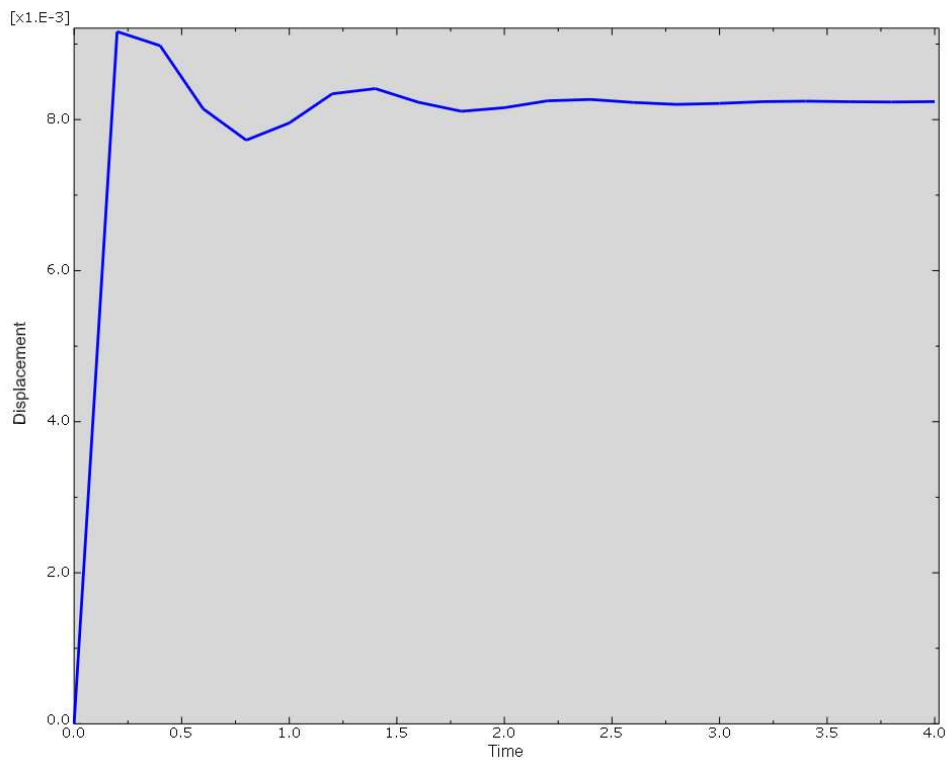


Slika 14: Določitev armature v izbrani ploskvi.

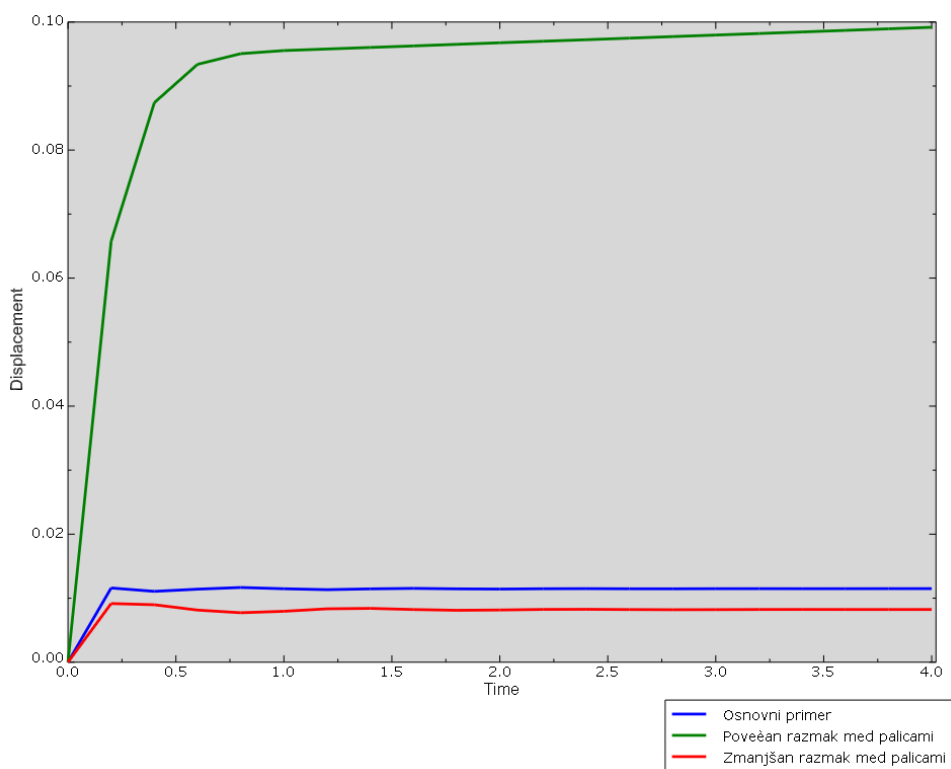
je gladka, kar je posledica večje podajnosti stene. Oglejmo si še primer, ko je razdalja med armaturnimi palicami razpolovljena in znaša 2,5 cm. V tem primeru se količina armature na meter dolžine stene podvoji. Pomik doseže vrednost $u_2 = 8,2$ mm, opazno pa je tudi povečano nihanje okrog končnega pomika v začetnem delu (slika 16).

Slika 15: Pomik vrha stene armirane s palicami prereza $0,5 \text{ cm}^2$ na razdalji 10 cm.

Slika 17 kaže primerjavo pomikov vrha vseh treh modelov sten. V primeru, ko razmak med armaturnimi palicami povečamo, se pomik poveča skoraj devetkrat. Razmak med palicami je prevelik in zato armatura ne nudi dovolj opore steni. Kadar pa razmak razpolovimo, glede na osnovni model, se pomik zmanjša skoraj za tretjino. Na sliki ne zglada velika razlika, vendar je, gledano v odstotkih, zmanjšanje kar veliko.



Slika 16: Pomik vrha stene armirane s palicami prereza $0,5 \text{ cm}^2$ na razdalji 2,5 cm.

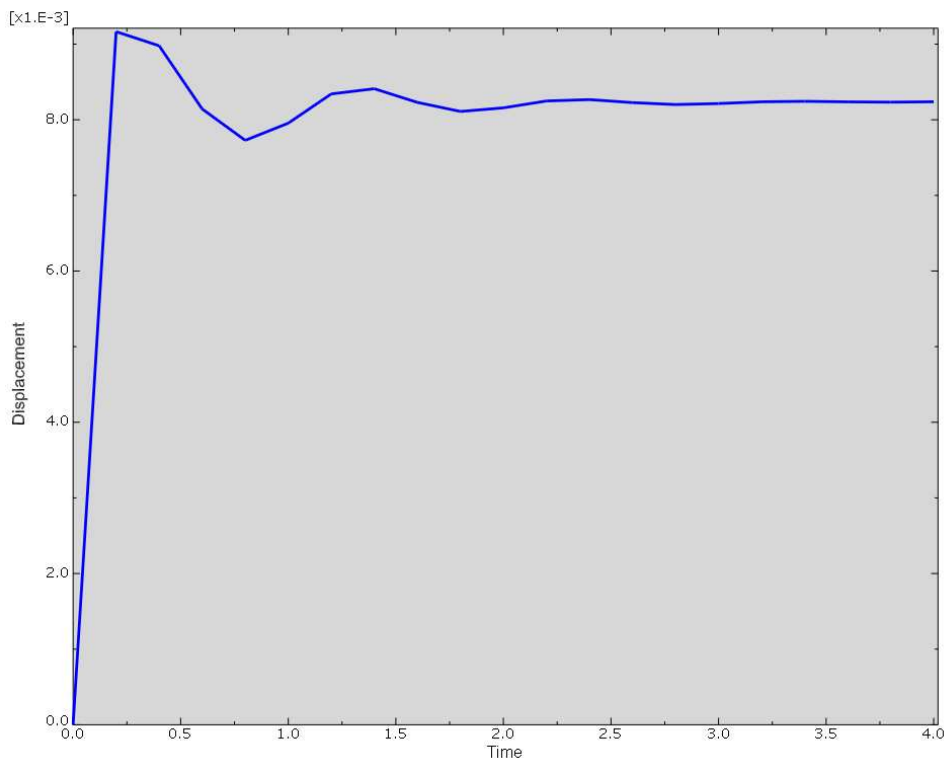


Slika 17: Primerjava pomikov armiranobetonske stene glede na razmak armaturnih palic.

3.5 Primerjava pomikov vrha stene glede na velikost prereza armaturnih palic

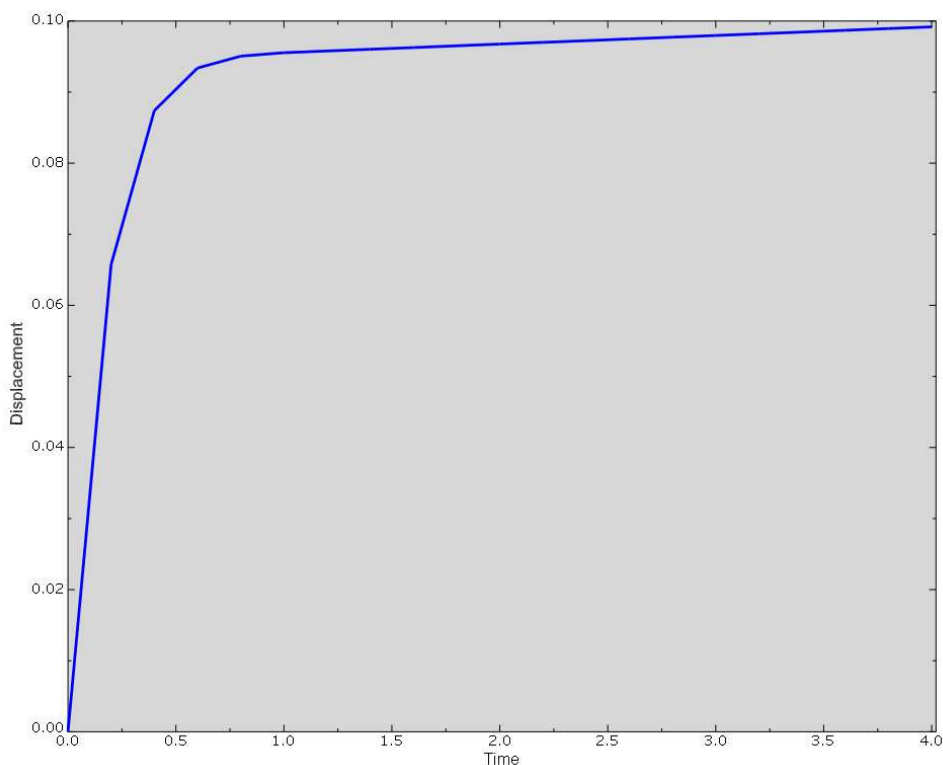
Enako kot v prejšnjih razdelkih bomo za osnovo uporabili model stene, armirane s palicami prečnega prereza $0,5 \text{ cm}^2$, postavljenimi na medsebojni razdalji 5 cm. V dveh različicah, bomo preverili kakšen vpliv ima prerez armaturne palice na pomik vrha stene. Enkrat bomo prerez palice povečali, drugič pa zmanjšali in rezultate primerjali z osnovnim modelom stene. Razmak med palicami bo v vseh različicah enak in bo znašal 5 cm. Palice so postavljene 5 cm od natezne strani stene.

V prvi različici bomo prerez armaturne palice podvojili. Ta znaša 1 cm^2 . Količina armature na meter širine stene je dvakrat večja od osnovnega primera. Z grafa pomika na sliki 18 je vidno, da pomik hitro naraste in v nadaljevanju, z zmanjševanjem amplitude, doseže končni pomik $u_2 = 8,2 \text{ mm}$. V drugi različici prerez armaturnih palic razpolovimo. Prerez palice je $0,25 \text{ cm}^2$. Količina armature na meter širine je za polovico manjša. Pomik vrha stene doseže vrednost $u_2 = 99,2 \text{ mm}$. Pomik počasneje narašča do končnega pomika in ne niha okrog tega (slika 19).



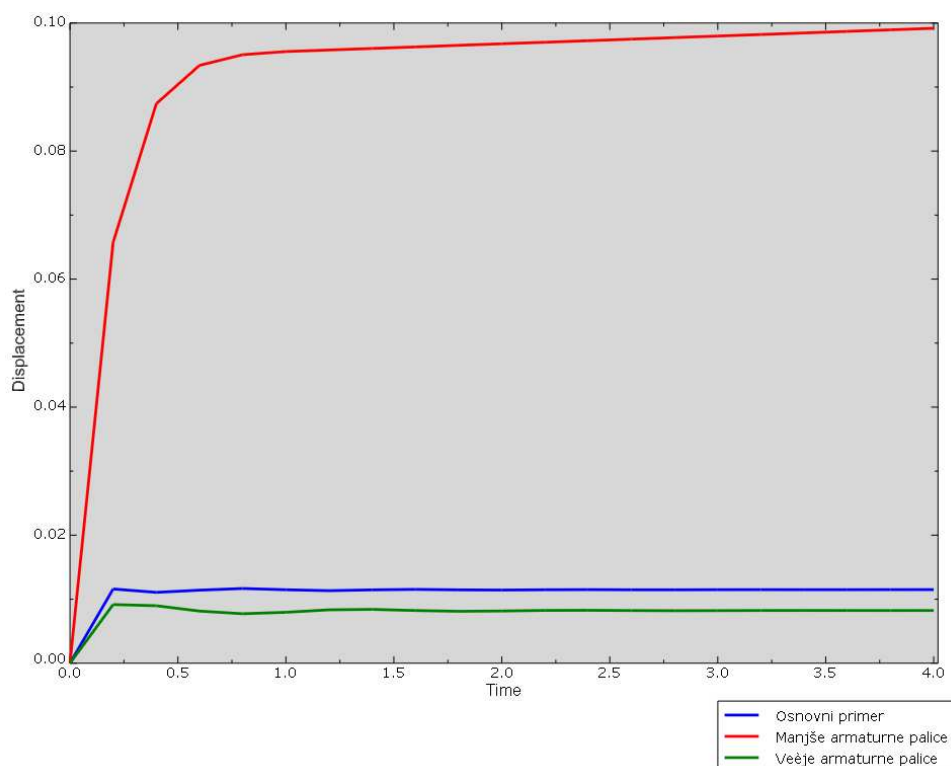
Slika 18: Pomik vrha stene armirane s palicami prereza 1 cm^2 na razdalji 5 cm.

Zaradi manjše količine armature je večji pomik pričakovan.



Slika 19: Pomik vrha stene armirane s palicami prereza $0,25 \text{ cm}^2$ na razdalji 5 cm.

Primerjava pomikov je prikazana na sliki 20. V primeru večjega prereza palice se pomik zmanjša, saj je stena bolj toga, v primeru manjših palic pa poveča, saj je stena bolj podajna. Če dobro pogledamo vse primere sten iz tega in prejšnjega razdelka, vidimo da sta pomika druge različice iz prejšnjega razdelka (prerez palice $0,5 \text{ cm}^2$ na razdalji 2,5 cm) in prve iz trenutnega (prerez palice 1 cm^2 na razdalji 5 cm) enaka. Enako velja tudi za prvo različico prejšnjega razdelka (prerez palice $0,5 \text{ cm}^2$ na razdalji 10 cm) in drugo trenutnega (premer palice $0,25 \text{ cm}^2$ na razdalji 5 cm). Takšen rezultat seveda ni presenetljiv, saj v obeh primerih z enakim grafom pomikov količina armature enaka in posledično pomik enak. Količina armature v prvem paru znaša $20 \text{ cm}^2/\text{m}$, v drugem pa $5 \text{ cm}^2/\text{m}$.



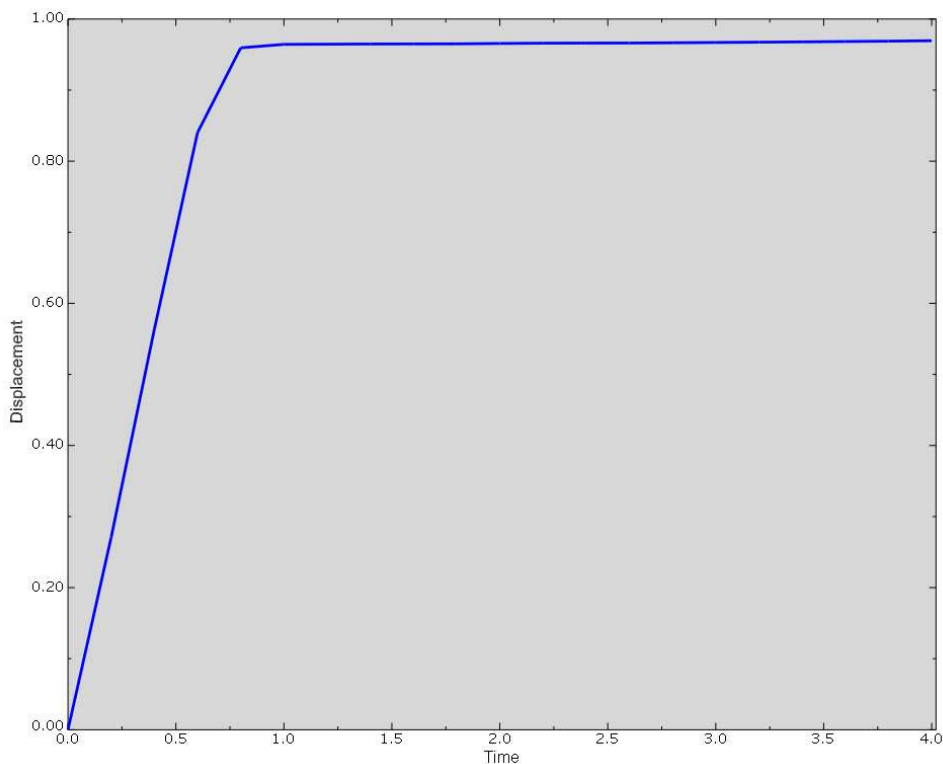
Slika 20: Primerjava pomikov vrha armiranobetonske stene glede na količino in razmak armature.

3.6 Primerjava pomikov vrha stene glede na pozicijo armature

Do sedaj smo preverili kako na pomik vrha stene vpliva način nanosa obtežbe, količina in razmak armaturnih palic. V tem razdelku bomo pogledali kako na pomik vpliva postavitve armature. Kot osnova nam bo ponovno služil primer stene z armaturnimi palicami na natezni strani stene. Način nanosa obtežbe bo hipni, armaturne palice imajo prečni prerez $0,5 \text{ cm}^2$ in so postavljene na razdalji 5 cm. Razlika bo v poziciji armature. V drugem primeru bo armatura postavljena 5 cm od roba tlačene strani stene, v tretjem pa jo bomo postavili na natezno in tlačeno stran stene, prav tako 5 cm od roba.

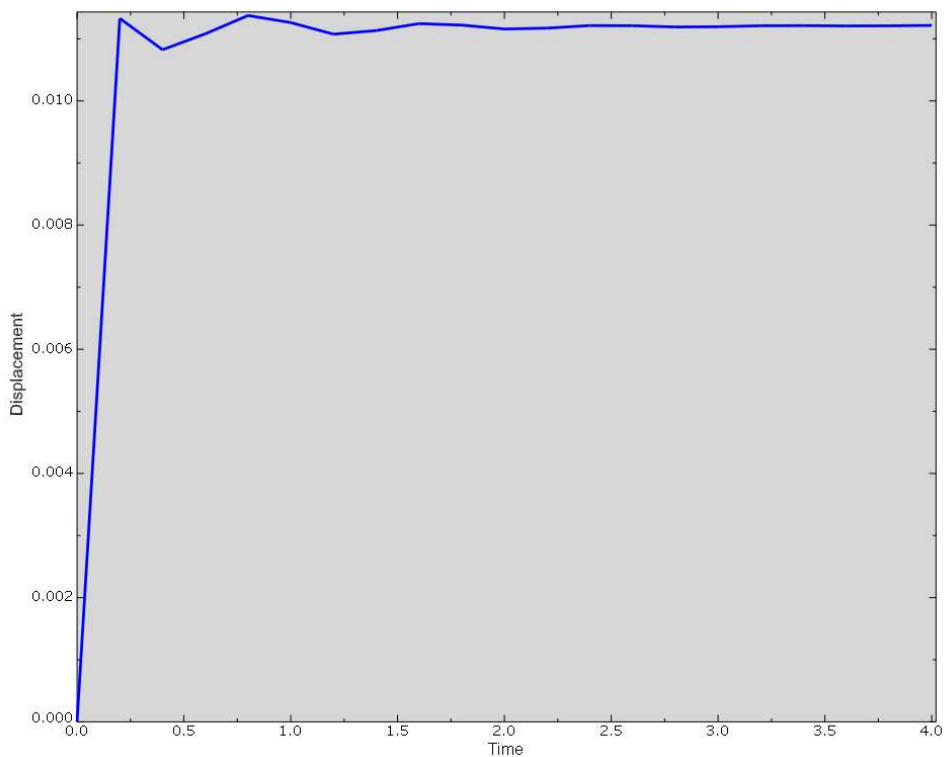
V drugem primeru pomik doseže vrednost $u_2 = 969 \text{ mm}$ (slika 21). Vrednost pomika je velika in očitno je, da namestitev armature na tlačeno stran ni primerna, saj armatura veliko bolje opravlja svojo nalogo, ko je natezno obremenjena. Tak primer je v praksi nesmiseln. V primeru, ko imamo armaturo postavljeno na obeh straneh stene, je vrednost končnega pomika $u_2 =$

11,2 mm (slika 22). Dobljena vrednost je podobna vrednosti iz osnovnega primera. Na sliki 23 je prikazana primerjava pomikov vrha stene glede na pozicijo armature znotraj stene. Krivulji osnovnega in tretjega primera se prekrivata.

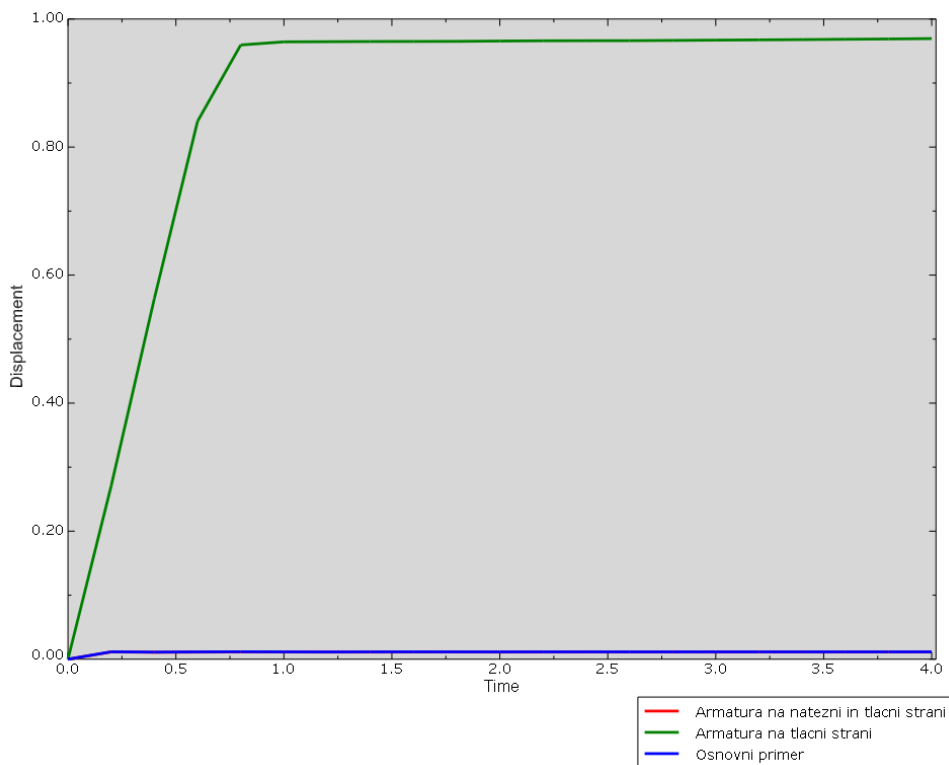


Slika 21: Pomik vrha stene pri postavitvi armature samo na tlačni strani stene.

V tem poglavju smo naredili večje število primerov armirane stene in s tem dobili znanje o modeliranju armiranih konstrukcij v računalniškem programu Abaqus. To bomo v nadaljevanju koristno uporabili pri modeliranju armiranobetonskega zabojnika.



Slika 22: Pomik vrha stene pri postavitvi armature na natezni in tlačni strani stene.



Slika 23: Primerjava pomikov vrha armiranobetonske stene glede na pozicijo armature (krivulji osnovnega in tretjega primera se prekrivata).

4 PADEC ARMIRANOBETONSKEGA ZABOJNIKA

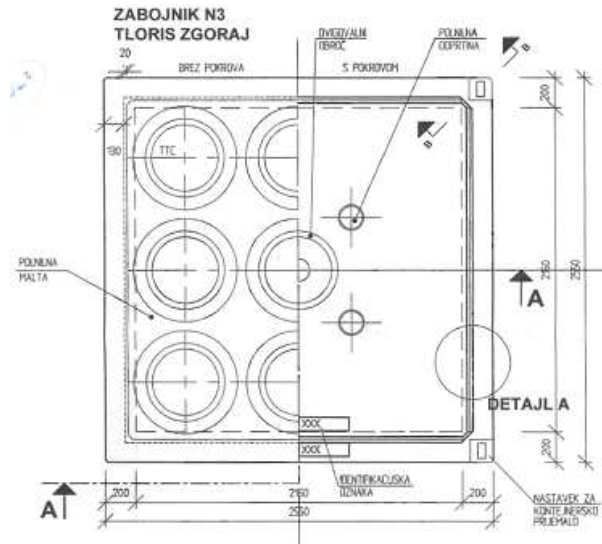
Obravnavamo armiranobetonski zabojnik za shranjevanje radioaktivnih odpadkov. Zabojnik je narejen iz armiranega betona, v notranjosti pa je votel (slika 24). Najprej se vanj položi radioaktivne odpadke v kovinskih posodah, nato se na vrh zabojnika položi pokrov, na koncu pa se notranjost zalije s polnilno malto. Takrat ko se malta strdi, poveže pokrov in ostali del zabojnika in tako ustvari kompaktno celoto. S simulacijami želimo pokazati kako se zabojnik poškoduje pri padcu z višine 30 cm. Upoštevamo, da zabojnika pade na vogal.



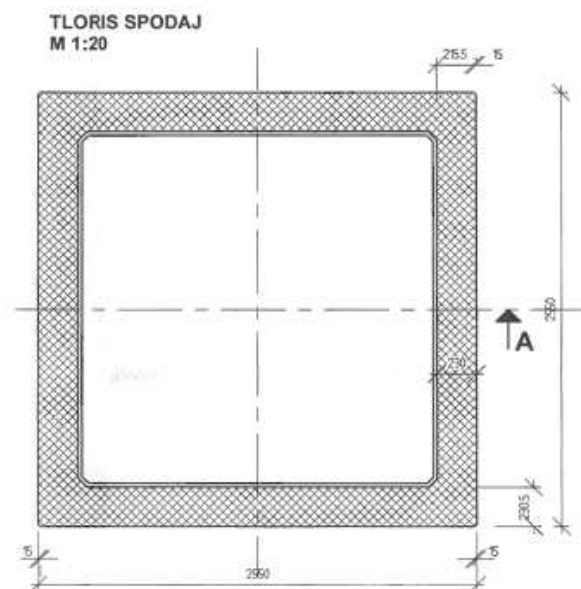
Slika 24: Armiranobetonski zabojnik za skladiščenje radioaktivnih odpadkov.

Zabojnik je visok 3,25 m, v širino in dolžino pa meri 2,55 m. Debelina sten, dna in pokrova zabojnika je 200 mm. Na slikah 25 - 28 je prikazana točna geometrija zabojnika. Enote so v milimetrih. Masa polnega zabojnika znaša okoli 60 t. Za beton predpostavimo specifično maso 2500 kg/m^3 , za polnilo pa 3000 kg/m^3 .

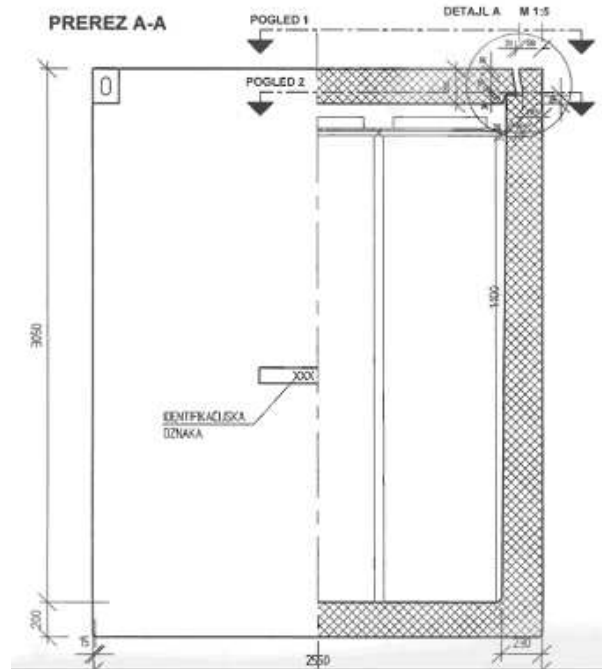
Dimenzije in materialne karakteristike zabojnika poznamo zato lahko v programu Abaqus izdelamo model za simulacije. Model zabojnika je precej kompleksen, zato računalniški program posamezno simulacijo računa dolgo časa. Na začetku bomo naredili preprost model zabojnika z manjšim številom končnih elementov. Simulacije takega modela so časovno manj potratne in tako primerne za pridobitev znanja, ki ga bomo uporabili pri natančnem modelu. Zaradi kratkega časa računa simulacij lahko preizkušamo različne variante modela zabojnika in ovrednotimo katere spremembe je vredno vključiti v natančnejši model. Pri slednjem bomo zgostili mrežo končnih elementov in tako dobili natančnejše rezultate.



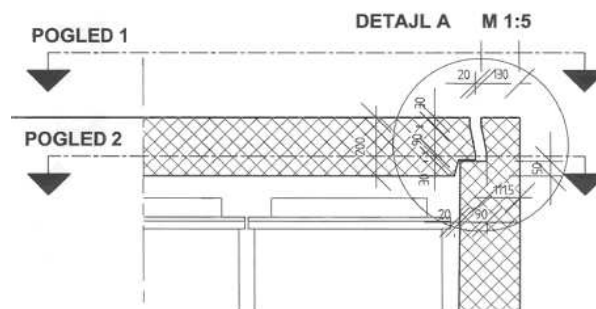
Slika 25: Tloris zabojnika zgoraj.



Slika 26: Tloris zabojnika spodaj.



Slika 27: Prerez zabojnika.



Slika 28: Detajl stika pokrova in stene zabojnika.

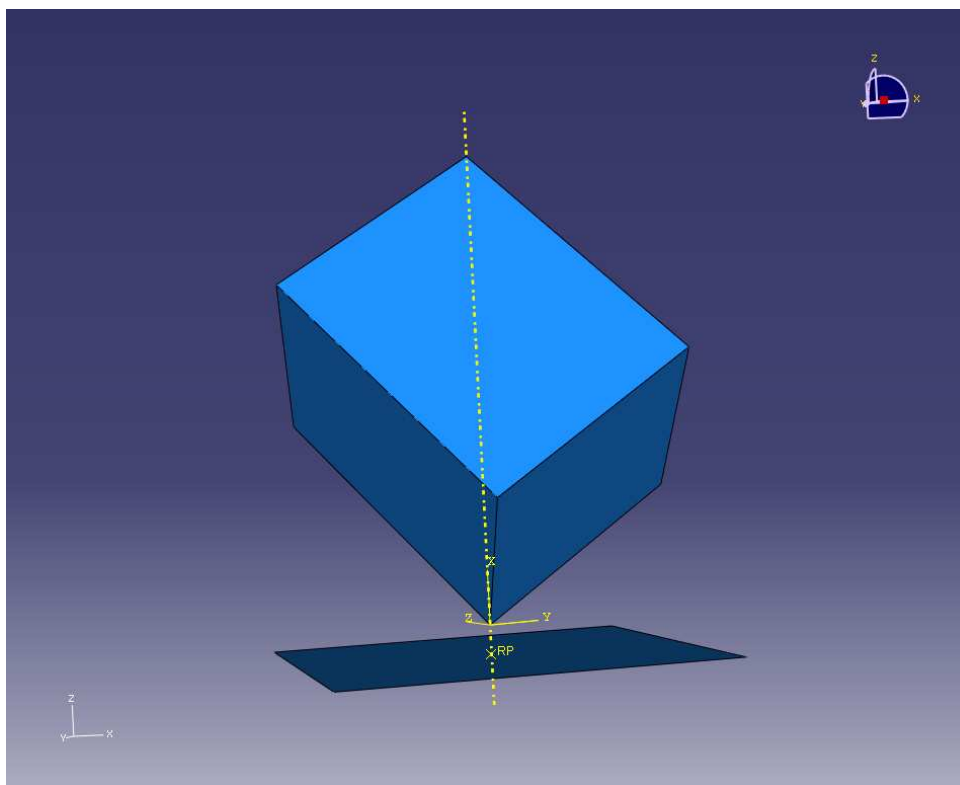
4.1 Preprost model zabojnika

Realen model zabojnika je zelo kompleksen, zato bomo najprej naredili preprost model. V računalniški program Abaqus bomo modelirali zabojnik in togo podlago. Vse različice obravnavanih modelov so narejene tako, da zabojnik z vogalom zadene ob togo podlago, saj v takem primeru pride do največjih poškodb zabojnika. Problem bomo malce poenostavili tako, da bo celoten zabojnik, vključno z notranjo vsebino, iz istega materiala. Naš začetni model bo betonski kvader. V tem razdelku armature ne bomo vključili v model. Preskušali bomo geometrijske karakteristike zabojnika, uporabili različne oblike končnih elementov in poskušali najti način, kako čim bolj skrajšati čas simulacije. Spremembe modela, ki bodo dale pozitivne rezultate bomo uporabili pri natančnem modelu.

4.1.1 Modeliranje osnovnega preprostega modela zabojnika

Betonski zabojnik ima naslednje mere: višina 3,25 m, širina in debelina 2,55 m. Notranjosti ne bomo modelirali posebej, ampak bomo zabojnik in notranjost modelirali kot enoten betonski kvader. V računalniški program Abaqus vrišemo kvader izbranih dimenzij, ki bo predstavljal naš zabojnik. Nato vrišemo ploskev, ki bo predstavljala togo podlago. Pri vnosu tega elementa je potrebno označiti, da je element tog. To naredimo z ukazom *Discrete Rigid*, ki zagotavlja, da se ploskev ob trku z zabojnikom ne deformira. Nato kjerkoli na ploskvi izberemo referenčno točko, ki ji preprečimo pomik in zasuke. Na ta način se cela ploskev ne more premakniti in zasukati in toga podlaga je ustvarjena. Materialni model beton bo enak kot v primeru stene. Karakteristike betona so: specifična teža $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$, elastični modul $E = 3200 \text{ kN/cm}^2$, Poissonov količnik $\nu = 0,2$, dilatacijski kot $\psi = 36^\circ$, ekscentričnost plastičnega toka $\varepsilon = 0,1$, začetno razmerje med napetostjo tečenja pri dvoosnem tlačnem napetostnem stanju in napetostjo pri meji tečenja pri enoosnem tlačnem napetostnem stanju $\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}} = 1,16$, razmerje, ki določa razliko med mejo tečenja v tlaku in mejo tečenja v nategu $K_c = \frac{2}{3}$ in koeficient viskoznosti materiala $\mu = 0$. Zdaj moramo naš zabojnik zasukati tako, da bo pri padcu pristal na vogalu. Telesna diagonala zabojnika je pravokotna na togo podlago. Končno zabojnik namestimo 30 cm nad ploskvijo, ki prestavlja togo podlago (slika 29).

Predpostavimo, da je koeficient trenja med zabojnikom in togo podlago 0,3. Zabojnik obremenimo s težnostnim pospeškom $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ kar je tudi edina obremenitev zabojnika. Zabojnik

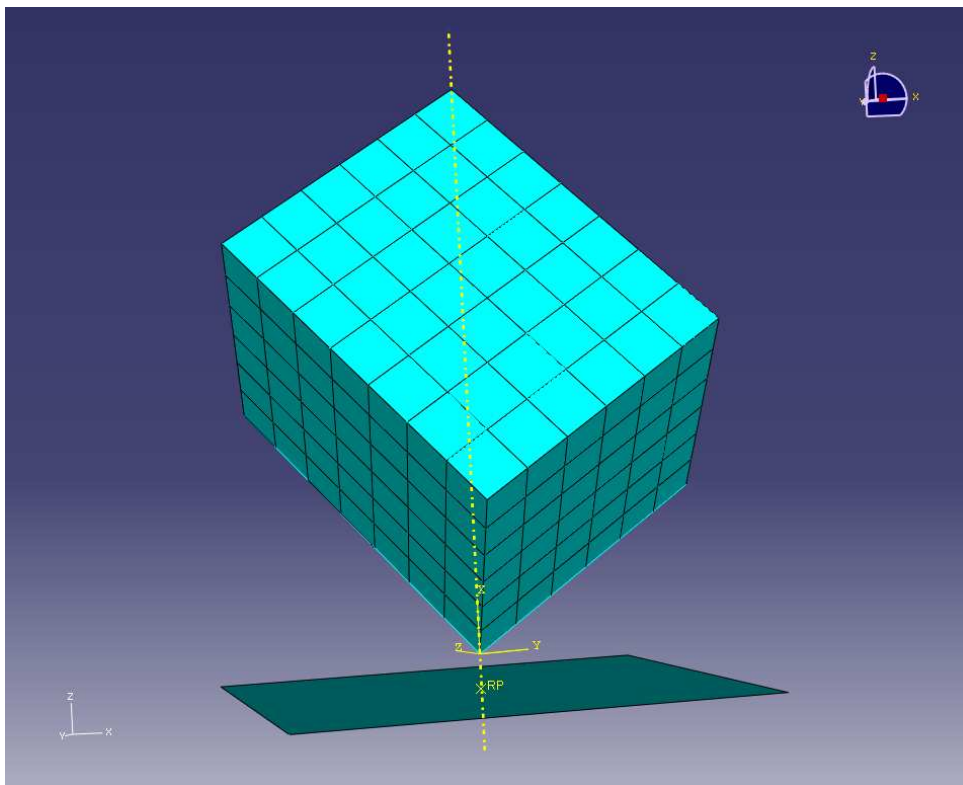


Slika 29: Model zabojnika namestimo 30 cm nad togo podlago.

bo na togo podlago padel le zaradi vpliva lastne teže. Preden poženemo simulacijo moramo le še razdeliti zabojnika na končne elemente. Izberemo prostorski (tridimenzionalni) končni element z osmimi vozlišči in eno integracijsko točko. V programu Abaqus je izbrani končni element označen kot C3D8R. Krajši stranici zabojnika razdelimo na 6, daljšo pa na 7 končnih elementov (slika 30).

Različne modele bomo med seboj primerjali na podlagi energij, ki nastanejo v času padca. Računalniški program Abaqus prikaže grafe naslednjih energij:

- ALLAE - nerealna (umetna) energija zabojnika, ki nastane zaradi numeričnih napak in zaradi nerealnih deformacijskih oblik izbranega podintegriranega končnega elementa,
- ALLDMD - del energije, ki se disipira zaradi poškodovanosti materiala,
- ALLWK - delo zunanjih sil,
- ALLFD - del energije, ki se disipira zaradi trenja med zabojnikom in togo podlago,
- ALLIE - notranja energija zabojnika ,



Slika 30: Razdelitev zabojnika na končne elemente.

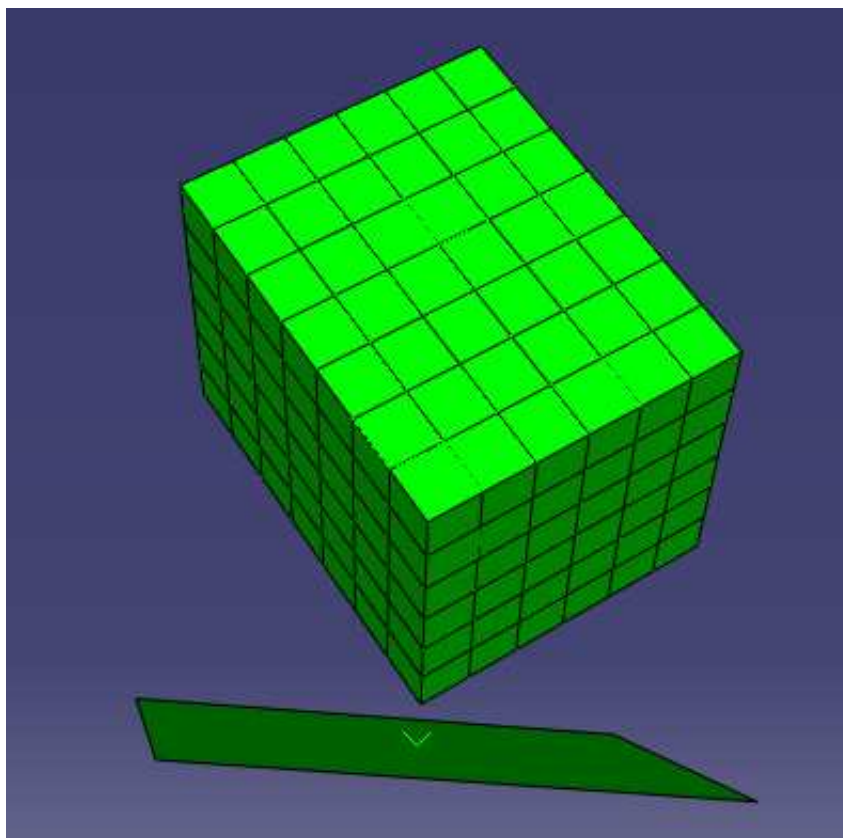
- ALLKE - kinetična energija zabojnika,
- ALLPD - del energije, ki se disipira zaradi plastifikacije materiala,
- ALLSE - deformacijska (prožnostna) energija zabojnika ,
- ETOTAL - celotna energija,
- ALLVD - del energije, ki se disipira zaradi viskoznosti materiala.

Energiji ALLIE in ETOTAL se izračunata po naslednjih enačbah:

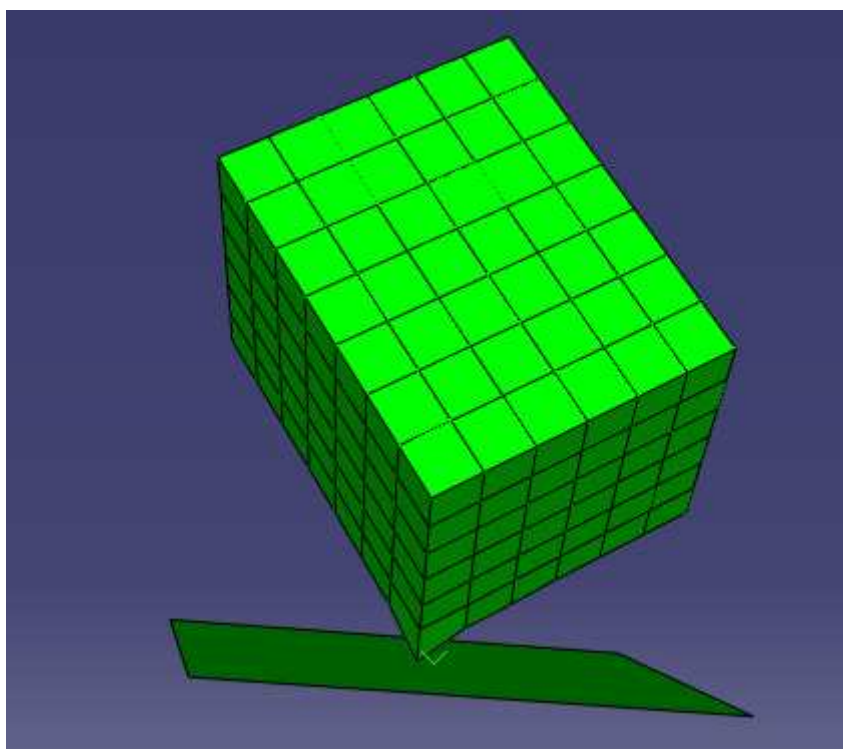
$$ALLIE = ALLSE + ALLPD + ALLAE + ALLDMD, \quad (16)$$

$$ETOTAL = ALLKE + ALLIE + ALLVD + ALLFD - ALLWK. \quad (17)$$

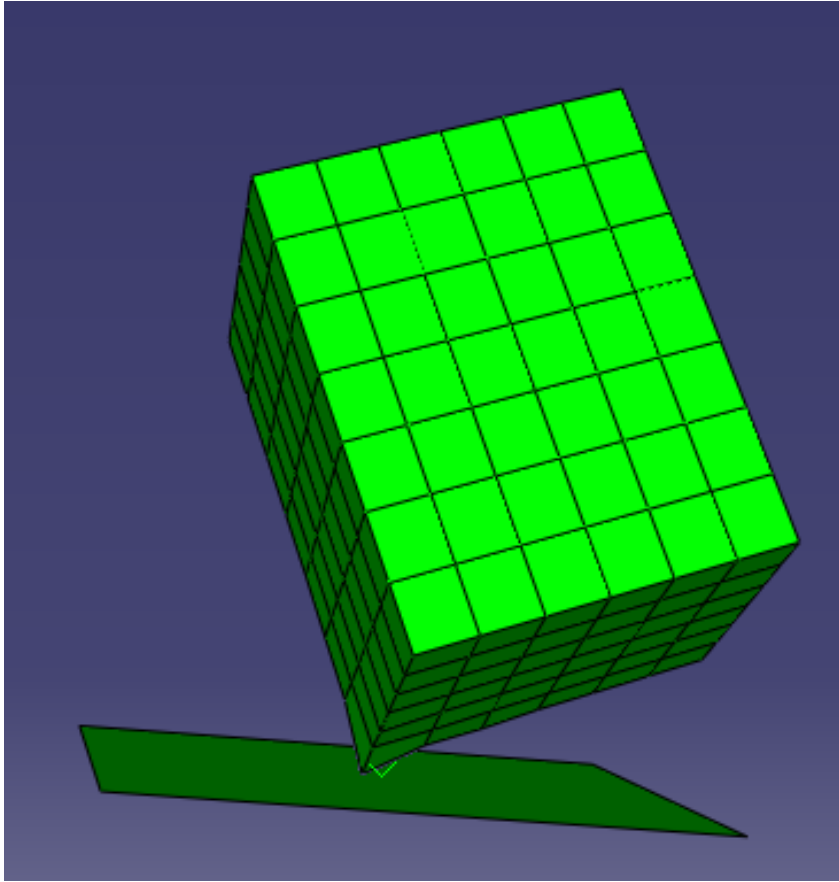
Zabojnik pade na togo podlago z višine 30 cm. Ob trku se zabojnik nagne in posledično pod delovanjem sile teže zvrne. Prevrnitev zabojnika je pričakovan pojav. Gibanje zabojnika je prikazano na slikah 31 - 34.



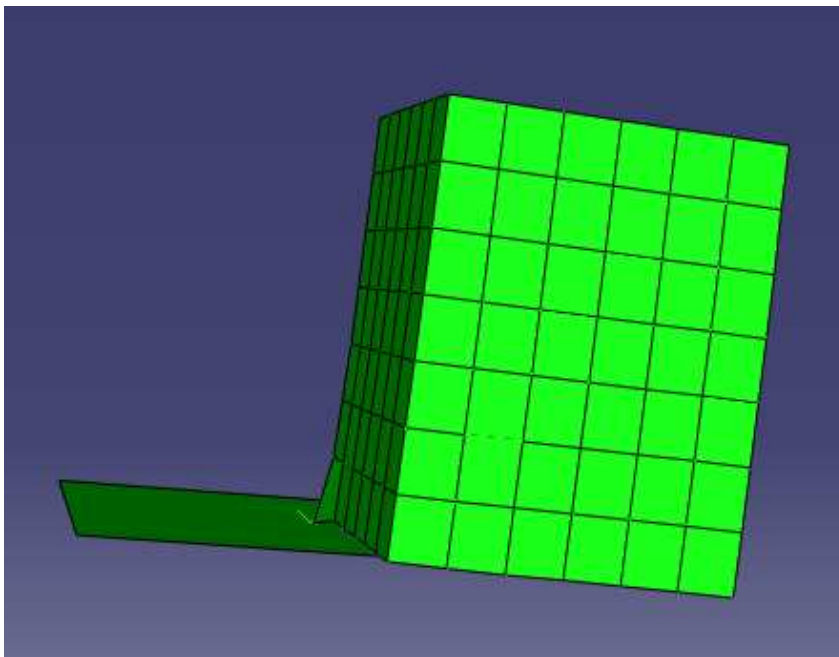
Slika 31: Začetni položaj zabojnika.



Slika 32: Položaj zabojnika v času $t = 1$ s.

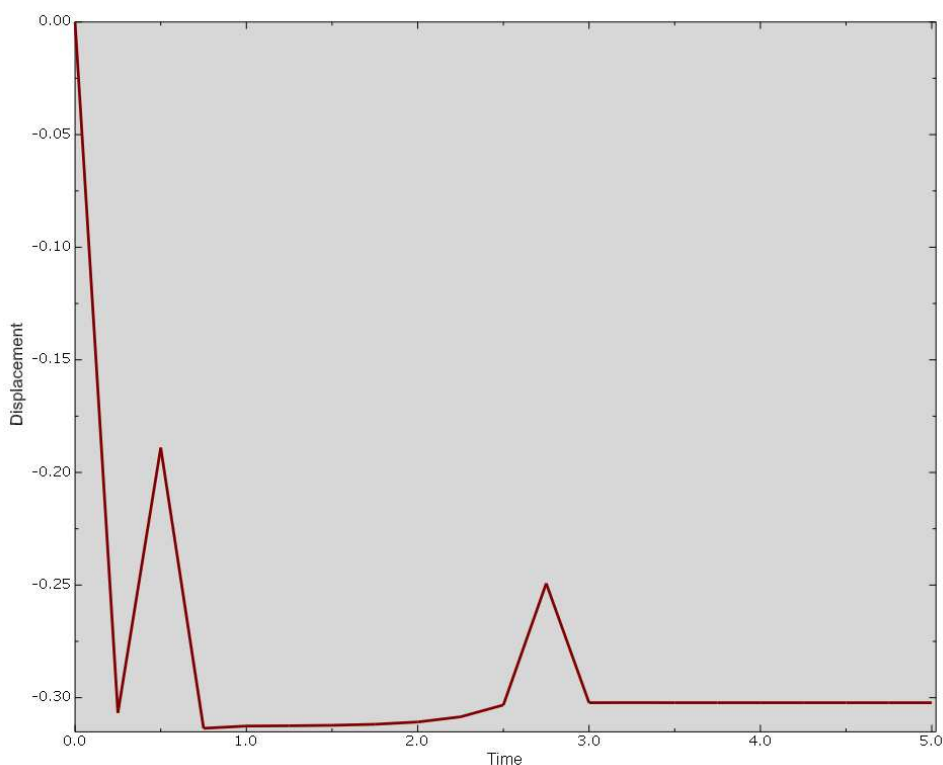


Slika 33: Položaj zabojnika v času $t = 2$ s.



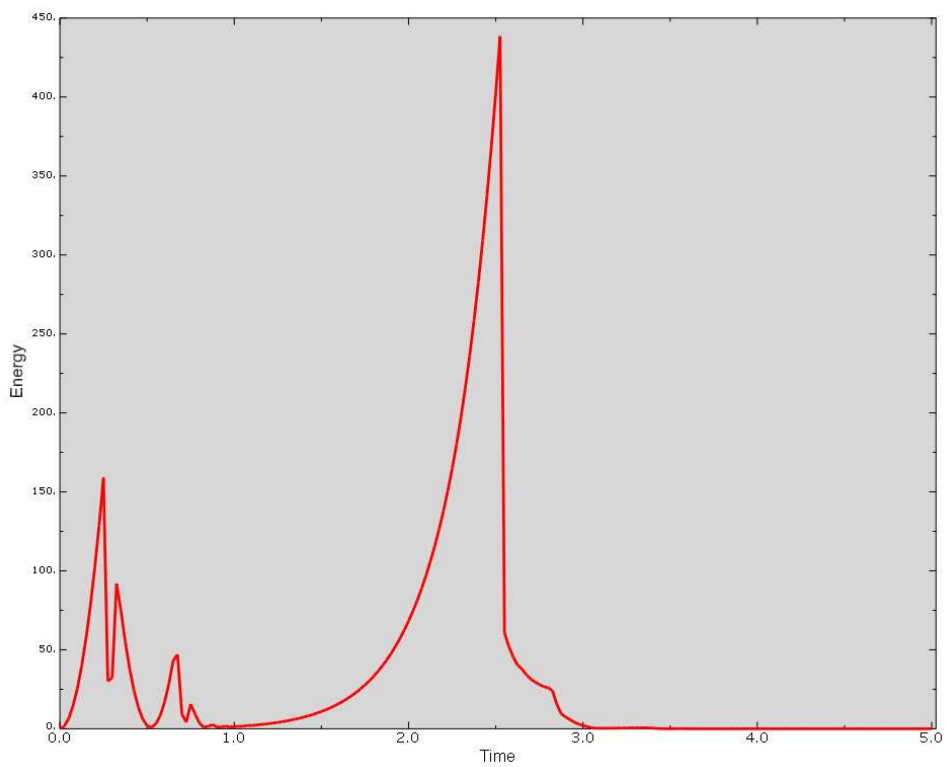
Slika 34: Položaj zabojnika v času $t = 3$ s.

Natančneje je gibanje zaboynika vidno iz grafa, ki prikazuje navpični pomik vogalne točke u_3 , na katero pade zaboynik, v odvisnosti od časa (slika 35). Pomik v začetku narašča do vrednosti $u_3 = 30$ cm. V času $t = 0,25$ s doseže to vrednost, to je v trenutku, ko zaboynik pristane na togi podlagi. V nadaljevanju se zaboynik zaradi trka odbije od podlage in v času $t = 0,75$ s ponovno prileti na togo podlago. Skok v času $t = 2,5$ s je posledica prevrnitve zaboynika. Zaradi vztrajnosti se del, ki je prvi trčil ob podlago, dvigne od podlage in kasneje, zaradi gravitacije, ponovno pade nanjo. Iz grafa kinetične energije (slika 36) vidimo, da le ta do trka s togo podlago narašča, nato niha, zaradi poskakovanja zaboynika in pade na ničlo. Za tem skokovito naraste in tako tudi pade, kar je posledica prevračanja zaboynika. Takrat, ko zaboynik dokončno pristane na tleh, pade kinetična energija na ničlo, saj od tod dalje zaboynik miruje.

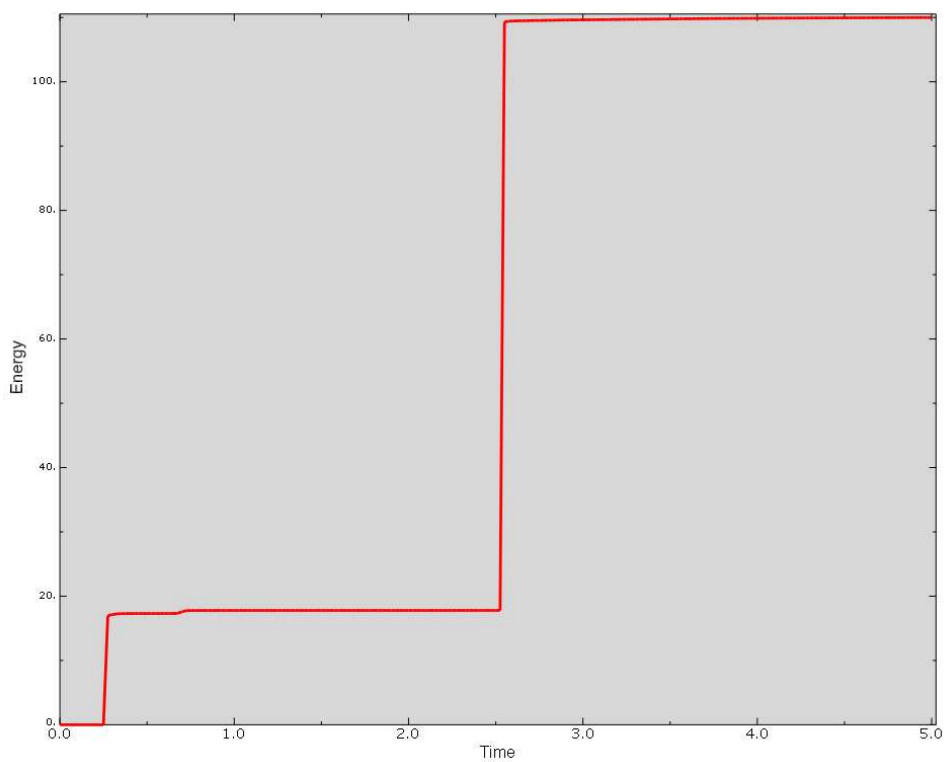


Slika 35: Navpični pomik vogalne točke u_3 .

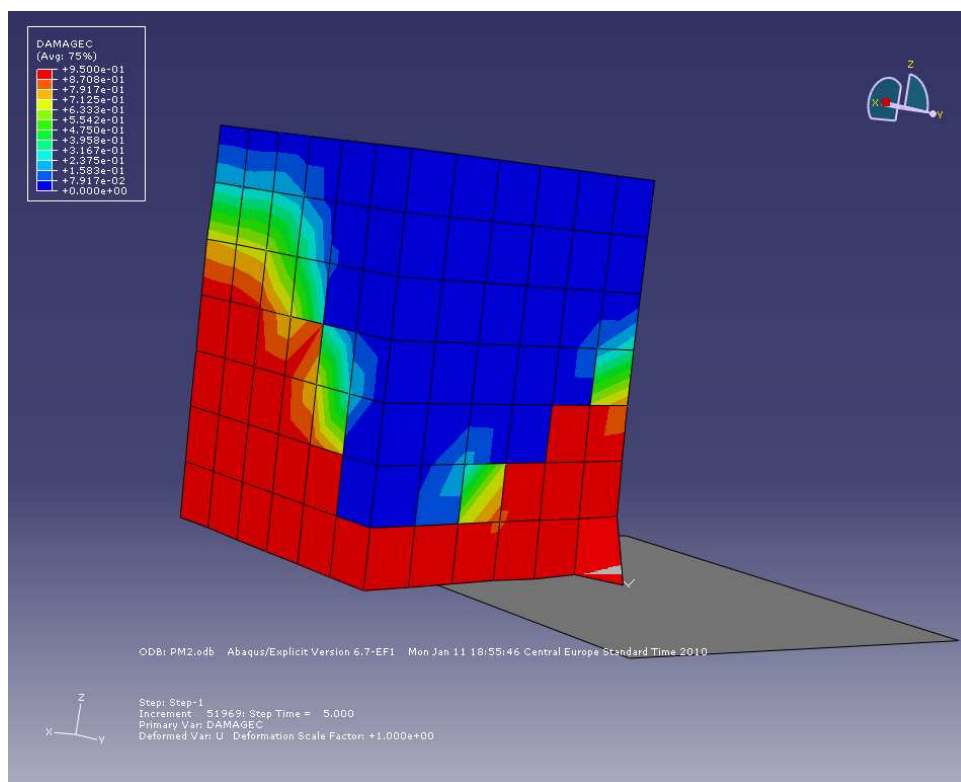
Pogled na graf energije, ki se disipira zaradi poškodovanosti materiala (slika 37), pokaže, da se zaboynik poškoduje ob prvem trku s podlago in kasneje, ko se prevrne na stranico. Do največjih poškodb pride na vogalu, na katerega pade, na stranici, na katero se prevrne in nad diagonalnim vogalom glede na poškodovano stranico, kar je razvidno tudi na sliki 38, ki prikazuje poškodovanost materiala v tlaku. Rdeče so obarvane cone, kjer je material popolnoma poškodovan. Zaradi velike sile ob prevrnitvi, se zaboynik veliko bolj poškoduje na spodnji strani.



Slika 36: Graf kinetične energije (ALLKE).

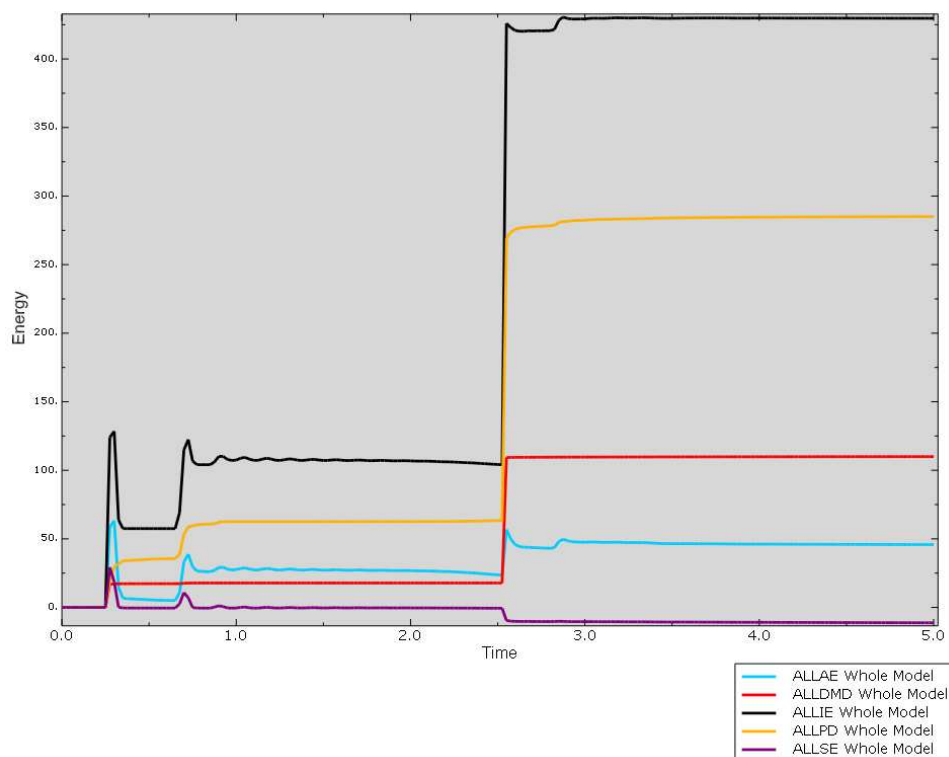


Slika 37: Graf energije, ki se disipira zaradi poškodovanosti materiala (ALLDMD).



Slika 38: Poškodovanost zabojnika po padcu (rdeče je obarvan popolnoma poškodovan material).

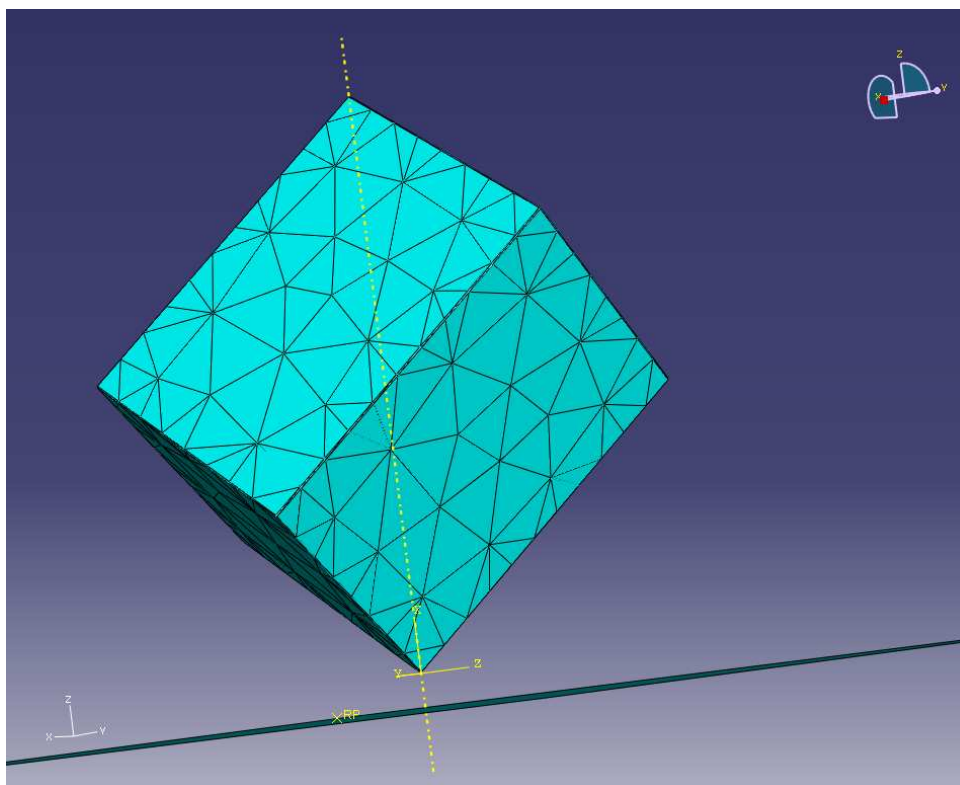
Na sliki 39 je prikazana celotna notranja energija (ALLIE), skupaj s posameznimi energijami, ki jo sestavljajo. Iz grafov je razvidno, da se vrednosti posameznih energij spreminjajo v trenutkih, ko zabojniki trči s podlago, to je v časih $t = 0,25$ s, $0,75$ s, $2,5$ s. Deformacijska energija je ves čas blizu vrednosti 0, kar je pričakovano, saj beton ni zelo deformabilen material. Velik delež notranje energije predstavljata energiji, ki se disipirata zaradi plastifikacije (ALLPD) in poškodovanosti materiala (ALLDMD). Presenetljivo visoka pa je vrednost nerealne energije zabojnika, ki nastane zaradi numeričnih napak (ALLAE). Ta predstavlja več kot 10 % celotne notranje energije. Vzrok verjetno tiči v sami geometriji zabojnika. Zabojniki so modelirani kot kvaderi in to pomeni, da so robovi in vogali ostri in imajo neskončno majhno površino, kar privede do velikih numeričnih napak. Zato bomo v naslednjem primeru porezali robove in preverili, če to zmanjša nerealno energijo pri spustu z višine 30 cm.



Slika 39: Graf notranje energije zabojnika (ALLIE) z energijami, ki jo sestavljajo.

4.1.2 Modeliranje zabojnika s porezanimi robovi

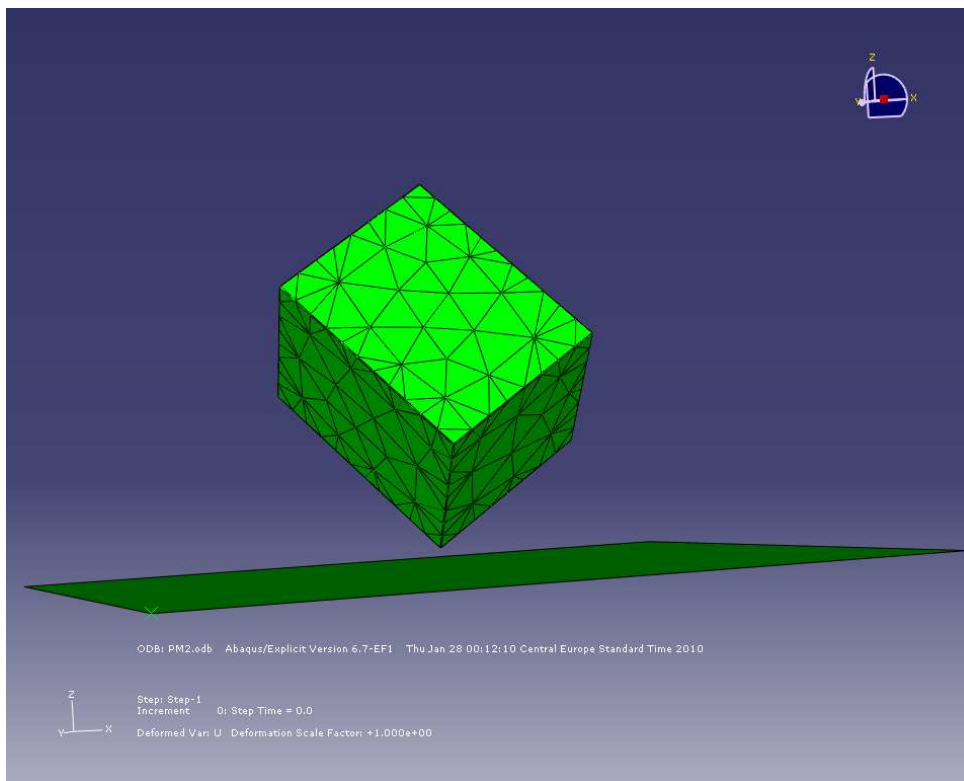
V osnovnem primeru so dobljeni rezultati pokazali, da je nerealna energija zaradi numeričnih napak velika v primerjavi z vrednostmi ostalih energij. Vzrok verjetno tiči v preveč natančni geometriji zabojnika, saj zabojnik pade na eno samo točko na vogalu. V realnosti takega primera ni, zato bomo robove zabojnika porezali. V računalniškem programu Abaqus to naredimo z ukazom *Create Round*. Na zabojniku označimo robove, ki jih želimo porezati in vnesemo radij zaokrožitve. V našem primeru je radij 1 cm. S tem ukrepom povečamo površino vogala, kar da realnejšo sliko zabojnika. Zaradi spremenjene geometrije zabojnika ne moremo več uporabiti osemvozliščnih kvadrastih končnih elementov, zato zabojnik razdelimo na štirivozliščne tetraedrične končne elemente. Taki elementi imajo v Abaqusu oznako C3D4. Računalniški program avtomatsko priredi mrežo končnih elementov glede na podana vozlišča (slika 40). V primeru uporabe štirivozliščnih končnih elementov nastane večje število elementov kot pri uporabi osemvozliščnih. To sta edini spremembi, ki ju naredimo. Zabojnik še vedno pade z višine 30 cm, materialni model betona je enak kot v osnovnem primeru in na zabojnik deluje le sila teže. Zdaj imamo vse pripravljeno za zagon simulacije.



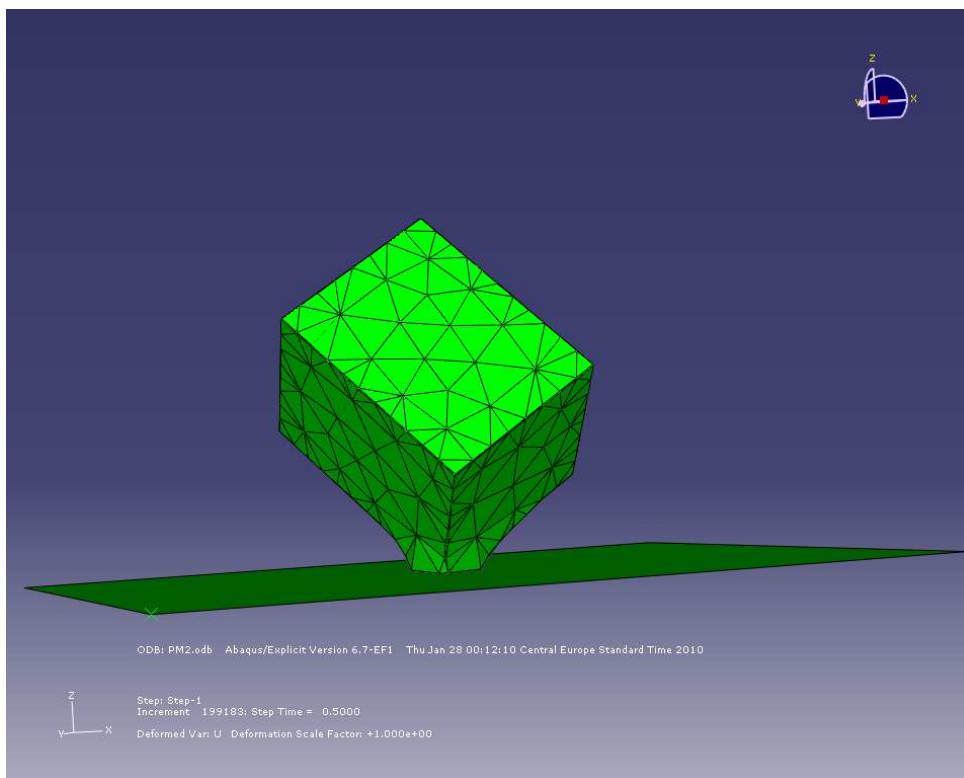
Slika 40: Zabojniki razdelimo na štirivozliščne tetraedrične končne elemente.

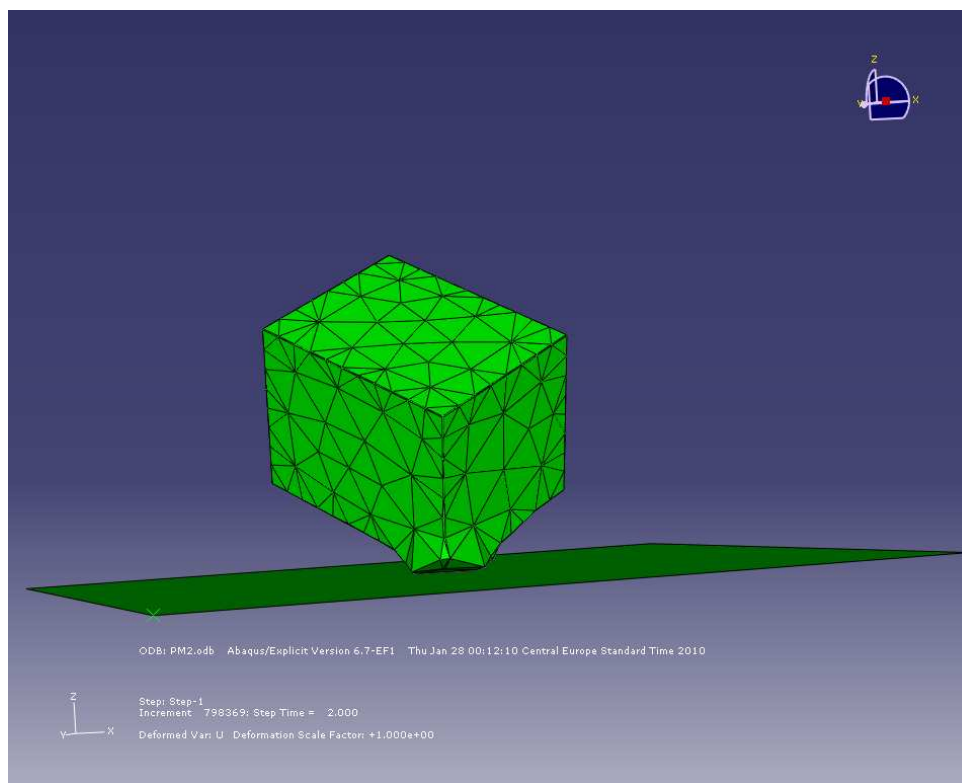
V osnovnem primeru je zabojniki odskočil po prvem trku in se nato prevrnil na manjšo stranico. V tem primeru pa zabojniki po trku s togo podlago ne odskoči, ampak se vogal, na katerega pade, precej deformira in v nadaljevanju se zabojniki zvrne na daljšo stranico. Slike 41 - 44 prikazujejo položaj zabojnika v različnih časih tekom simulacije. Na sliki 45, ki kaže odvisnost navpičnega pomika vogalne točke zabojnika od časa, vidimo da pomik narašča do vrednosti 30 cm, potem se velikost pomika umiri in nazadnje pade. Padeč je posledica zmečkanja vogala ob trku. Izbrana točka se zarije v notranjost zabojnika in se ob prevrnitvi oddalji od toge podlage. To je mogoče pri elastičnem materialu. V našem modelu ni upoštevano, da popolnoma poškodovan material odpade, zato se vogal zmečka. V realnem primeru bi bil vogal poškodovan in bi material v tem območju odpadel. Na sliki 46 je prikazana poškodovanost zabojnika. Rdeče so obarvane cone popolnoma poškodovanega materiala. Območje popolnoma poškodovanega materiala, je manjše kot v osnovnem primeru.

Oglejmo si še grafe energij. V prvem primeru nas je najbolj motila prevelika vrednost nerealne energije, ki pa je v tem modelu padla skoraj na 0 (slika 47). Iz tega razberemo, da je ostrost robov zabojnika problem in je izbrani ukrep dober, saj se je velikost numeričnih napak občutno zmanjšala. Graf kinetične energije je v tem primeru bolj gladek kot pri osnovnem modelu (slika

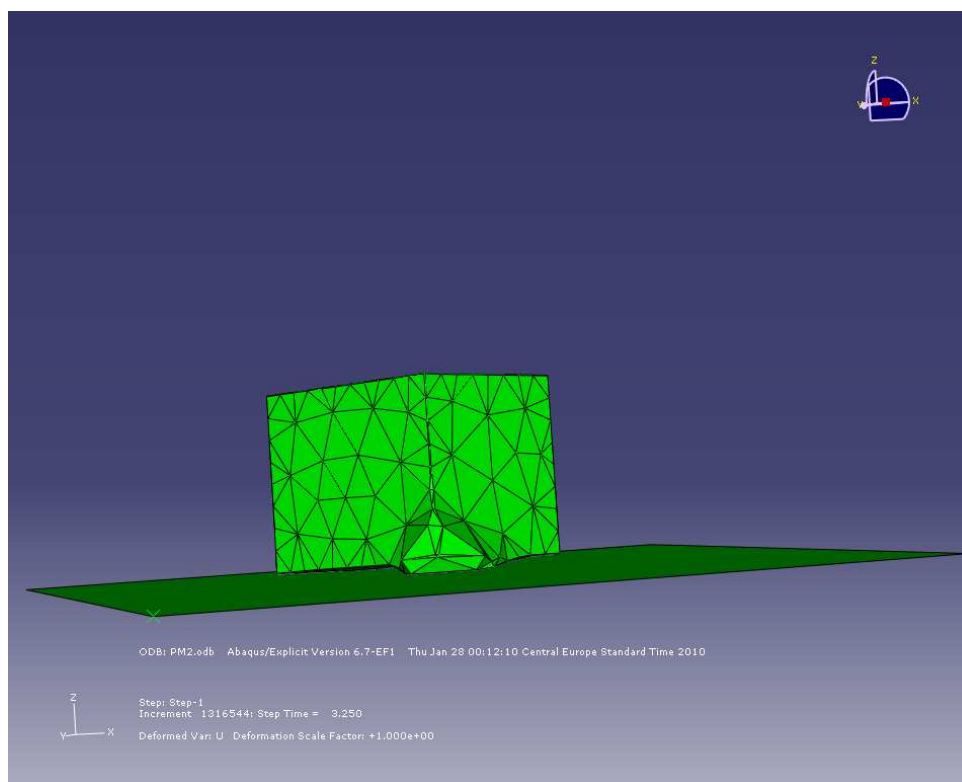


Slika 41: Začetni položaj zabojnika.

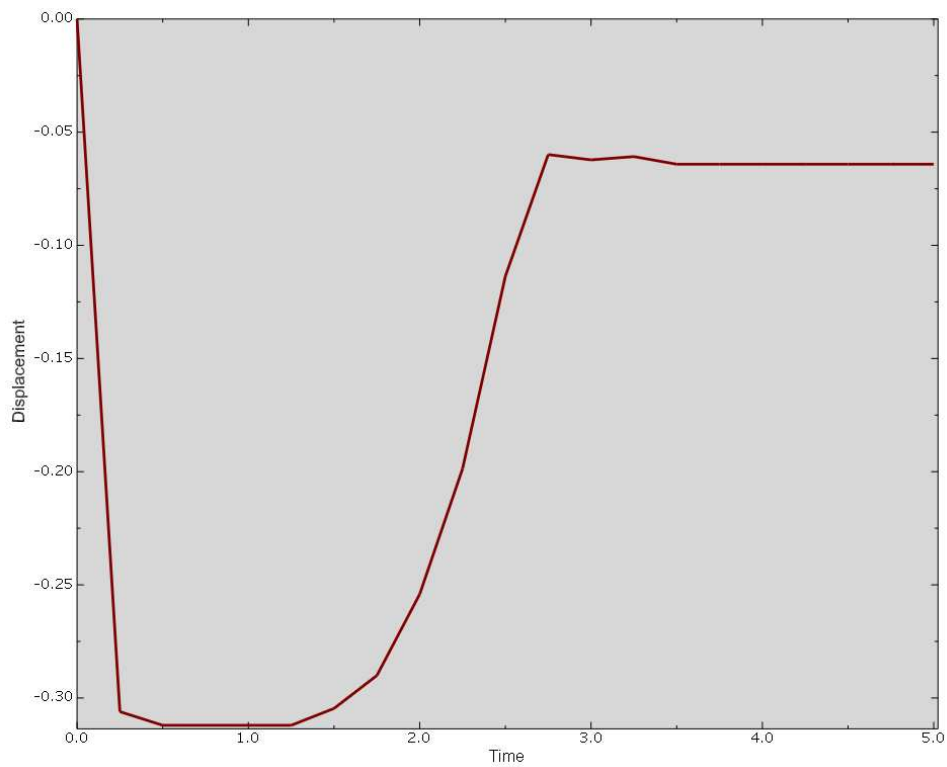
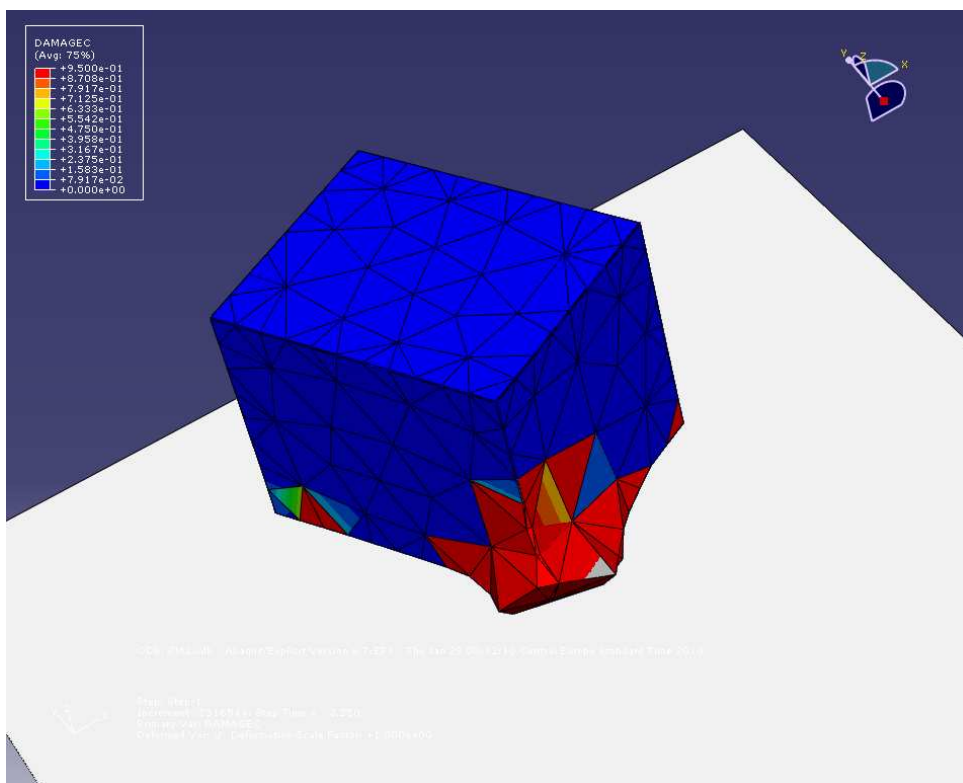
Slika 42: Položaj zabojnika v času $t = 0,5$ s.



Slika 43: Položaj zabojnika v času $t = 2$ s.

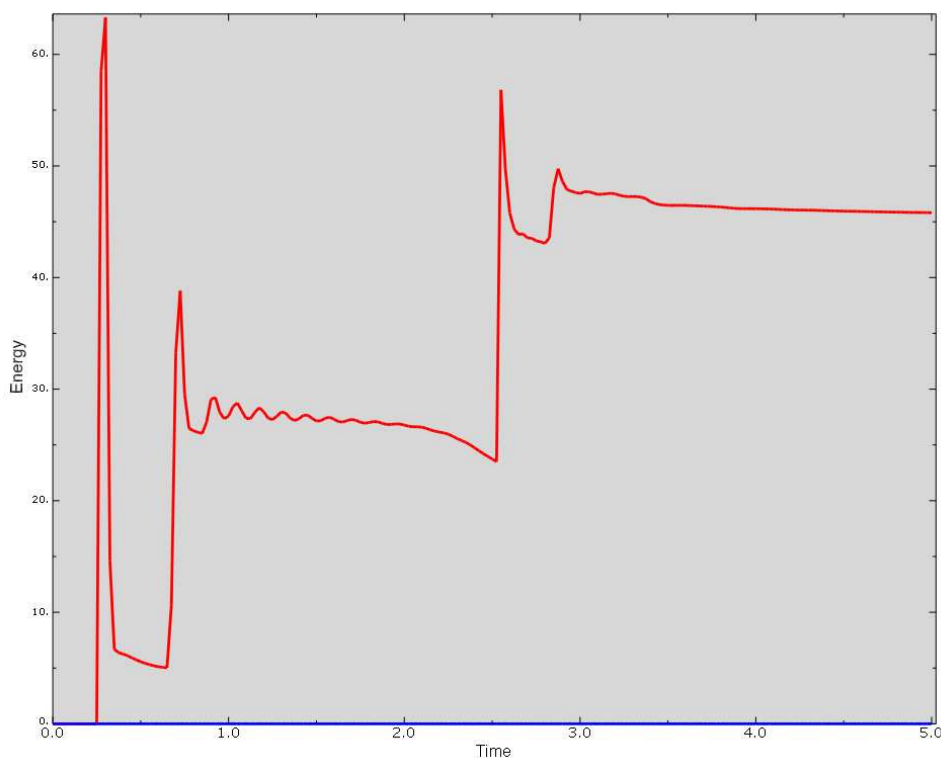


Slika 44: Položaj zabojnika v času $t = 3$ s.

Slika 45: Navpični pomik vogalne točke u_3 .

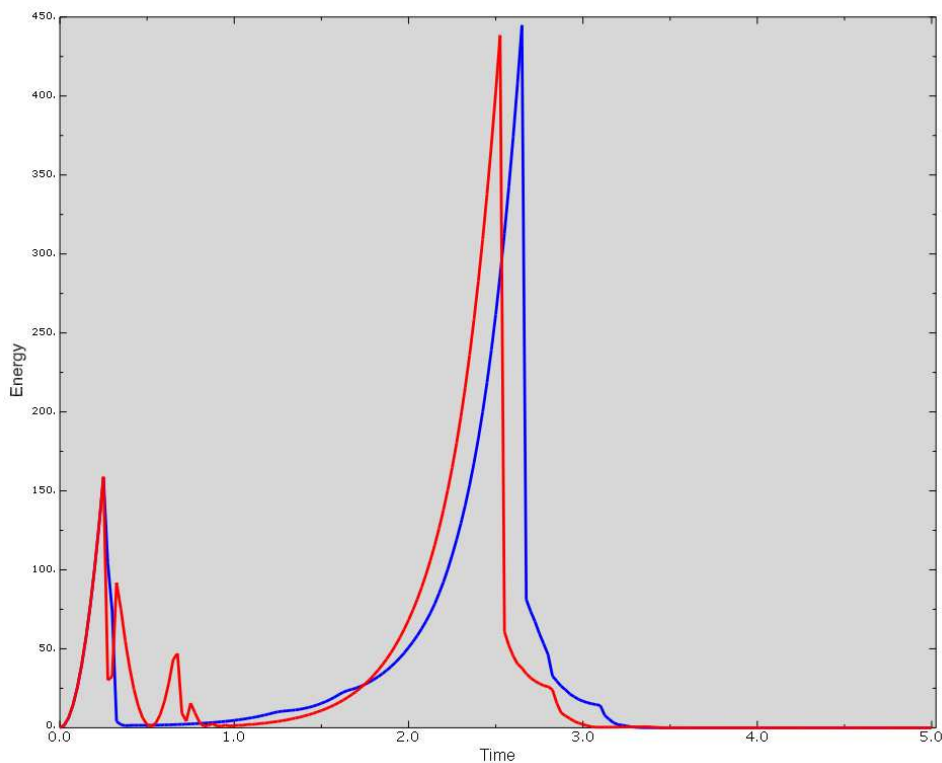
Slika 46: Poškodovanost zaboynika po padcu (rdeče je obarvan popolnoma poškodovan material).

48), saj zabojniki ob trku s togo podlago ne odskoči ampak se deformira in naknadno prevrne. Grafa obeh modelov sta v začetku enaka, kasneje nastane razlika zaradi skoka osnovnega modela. V nadaljevanju kinetična energija zopet poskoči zaradi prevrnitve zabojnika. Časovni zamik med grafoma nastane zaradi drugačnega obnašanja zabojnika pri trku s togo podlago. Če primerjamo disipacijsko energijo zaradi poškodovanosti (slika 49) in zunanje delo (slika 50), dobimo podobne rezultate pri obeh modelih. Razlik do trenutka trka ni, pojavijo pa se po njem. Za različne vrednosti je vzrok spremenjena geometrija zabojnika in posledično drugačen padec zabojnika. Nekaj pa prispevajo tudi oblika in število končnih elementov, saj jih je v drugem primeru bistveno več. Zamik grafov v drugem delu simulacije pa je odvisen od obnašanja zabojnika pri trku in prevrnitvi.



Slika 47: Primerjava nerealnih energij (rdeča - osnovni model, modra - model s porezanimi robovi).

S porezanjem robov smo skušali zmanjšati velikost numeričnih napak v modelu zabojnika in to smo tudi dosegli. Izbrani ukrep nas je prisilil v to, da smo uporabili drugačno vrsto končnih elementov. Opazna razlika med modeloma je tudi pri poškodovanosti materiala v tlaku. Pri modelu s porezanimi robovi se material popolnoma poškoduje na vogalu, na katerega pade, in na vogalu, ki leži diagonalno glede na stranico, na katero se zvrne zabojniki. Pri osnovnem modelu pa je popolnoma poškodovana celotna stranica, na katero se prevrne zabojniki. Ta razlika je lepo vidna če pogledamo prerez zabojnika na višini 0,5 m nad togo podlago (sliki 51 in 52).

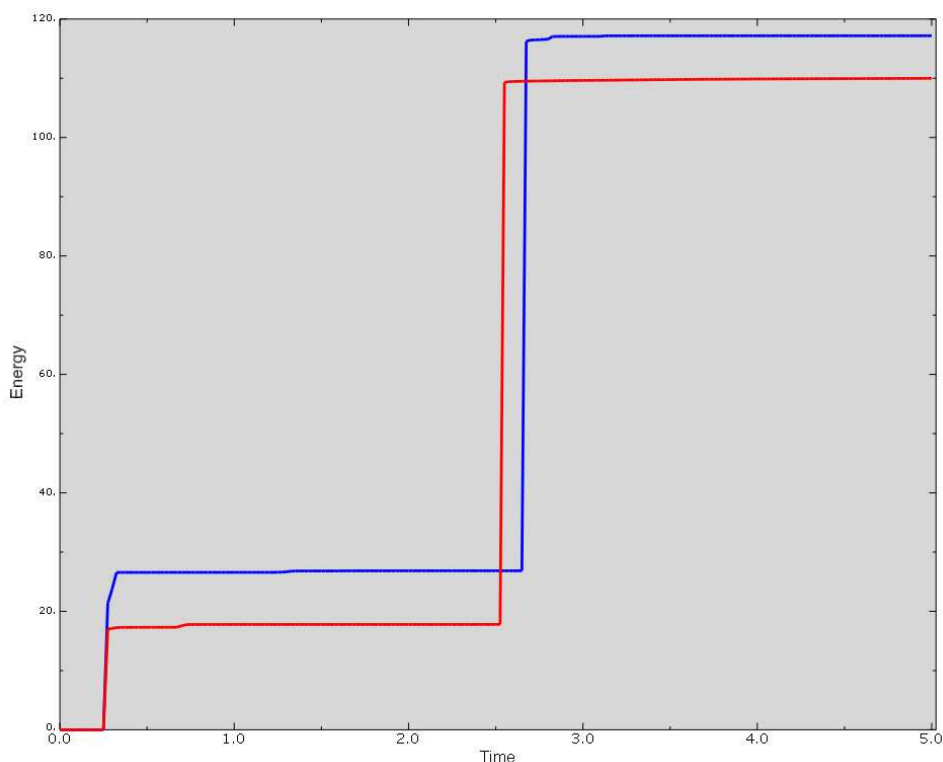


Slika 48: Primerjava kinetičnih energij (rdeča - osnovni model, modra - model s porezanimi robovi).

Drugačna oblika končnih elementov ima za posledico večje število elementov in zato daljši račun simulacije. Zato bomo naslednji model postavili tik nad togo podlago in ga obremenili s hitrostjo, ki bi jo zabožnik imel tik pred trkom. Tako se bo čas izračuna simulacije skrajšal. Iz rezultatov vidimo, da je model s porezanimi robovi in štirivozliščnimi končnimi elementi primernejši od osnovnega, zato bomo v nadaljevanju spreminjali spremenjeni model in ne osnovnega.

4.1.3 Modeliranje zabožnika z začetno hitrostjo

Čas izračuna simulacije bomo skrajšali tako, da bomo zabožnik postavili tik nad togo podlago in ga obremenili z začetno hitrostjo, ki bi jo imel ob padcu z višine 30 cm tik pred trkom s podlago. V času padca se zabožniku povečuje hitrost. To pomeni, da bi moral biti model zabožnika postavljen tik nad podlago in obremenjen z začetno hitrostjo ekvivalenten modelu padca zabožnika s predpisane višine. Dobljeni rezultati nam bodo potrdili oziroma ovrgli to



Slika 49: Primerjava energij, ki se disipirajo zaradi poškodovanosti materiala (rdeča - osnovni model, modra - model s porezanimi robovi).

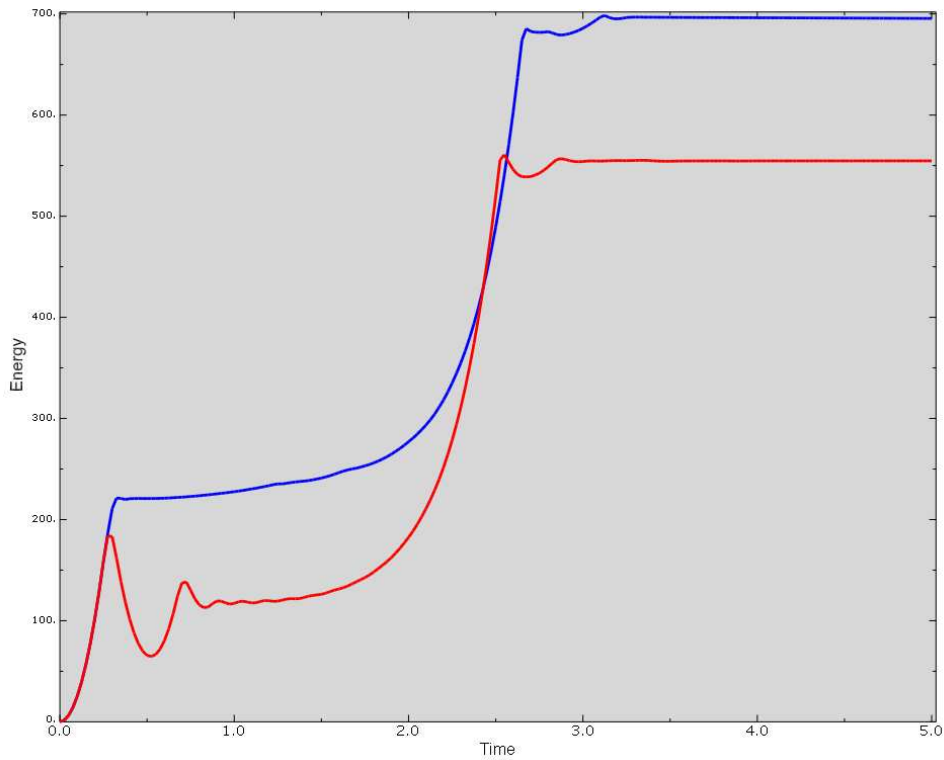
predpostavko. Začetno hitrost zabojnika izračunamo po naslednji enačbi:

$$v_0 = \sqrt{2 \cdot g \cdot s} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,3\text{m}} \approx 2,45 \frac{\text{m}}{\text{s}}. \quad (18)$$

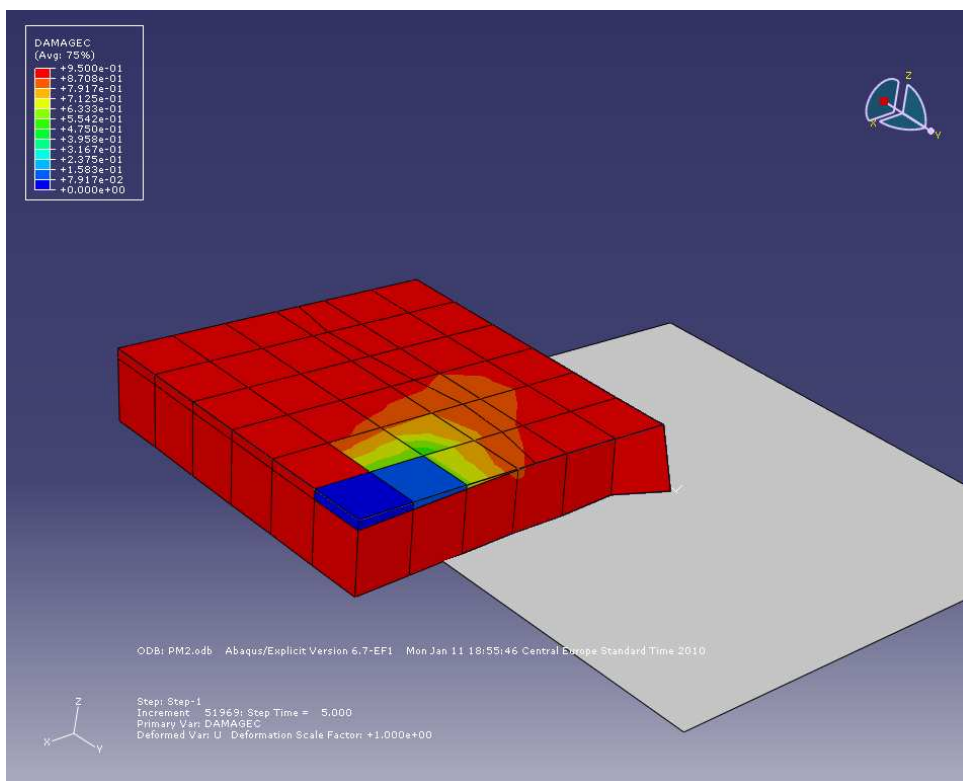
V enačbi 18 predstavlja g težnostni pospešek, s pa višino padca. Poleg začetne hitrosti na zabojniki še vedno deluje gravitacijska sila. Sam zabojniki bo enak kot v prejšnjem primeru, torej s porezanimi robovi in štirivozliščnimi končnimi elementi. Razlog za uporabo tega modela in ne osnovnega je, da smo pri tem modelu dobili boljše in natančnejše rezultate. Materialni model betona ostane enak.

V tem primeru ne bomo tako pozorni na gibanje zabojnika. Graf pomika spodnjega vogala bomo tokrat izpustili. Iz slik 53 - 56 je razvidno, da se zabojniki prevrne na enak način kot v prejšnjem primeru. S pomočjo grafov energij bomo določili ali sta modela ekvivalentna.

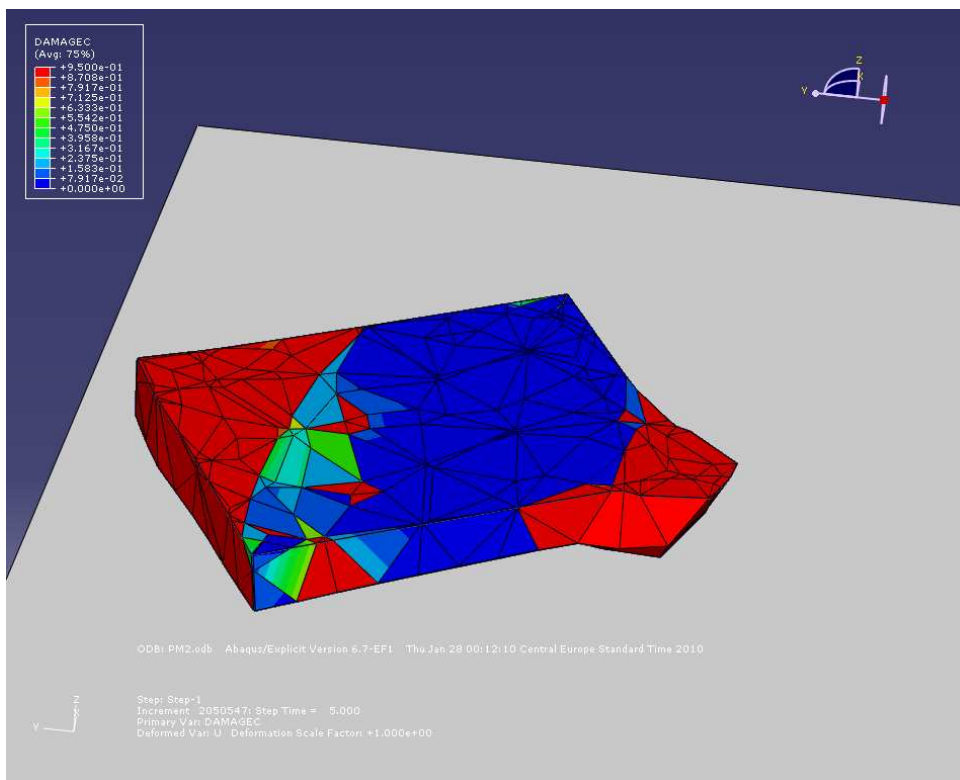
Na sliki 57 vidimo, da sta notranji energiji obeh modelov skoraj enaki. Notranja energija začne naraščati po trku s togo podlago. V primeru, ko zabojniki spustimo z višine, zabojniki trči ob podlago v času $t = 0,25$ s. Zabojniki z začetno hitrostjo pa takoj ob začetku simulacije. To je



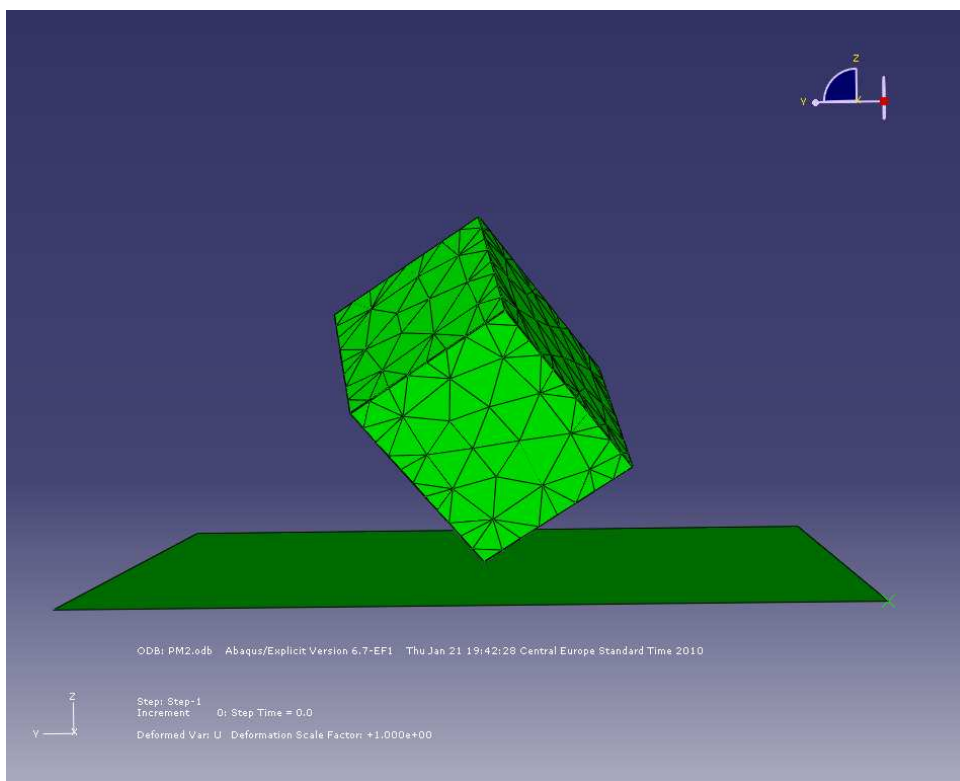
Slika 50: Primerjava zunanjega dela (rdeča - osnovni model, modra - model s porezanimi robovi).



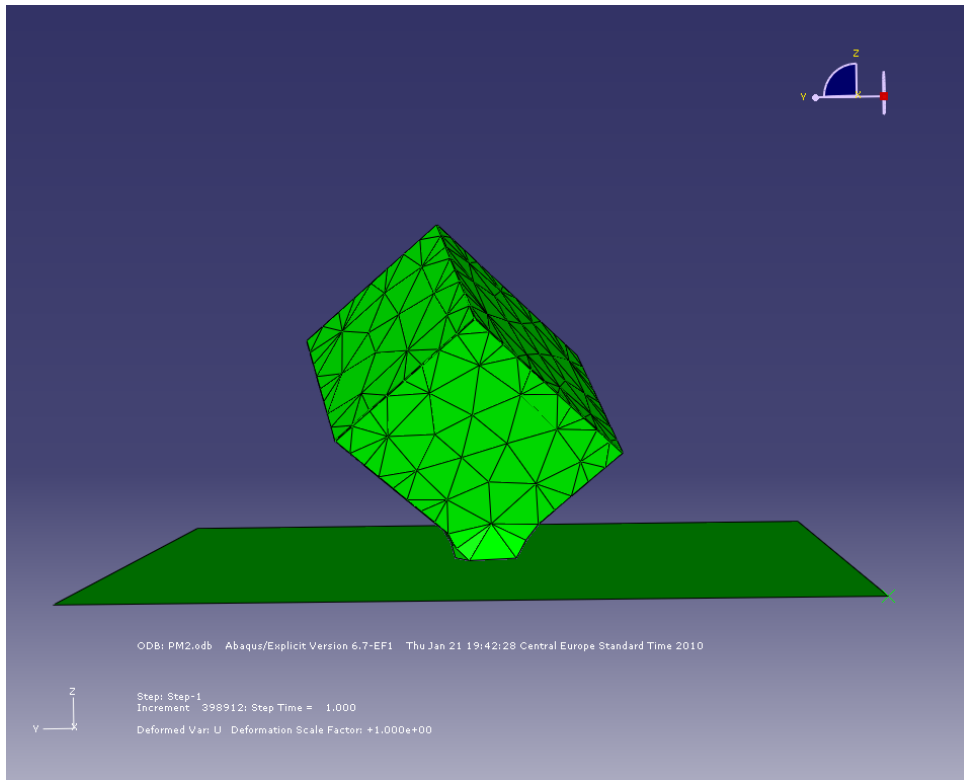
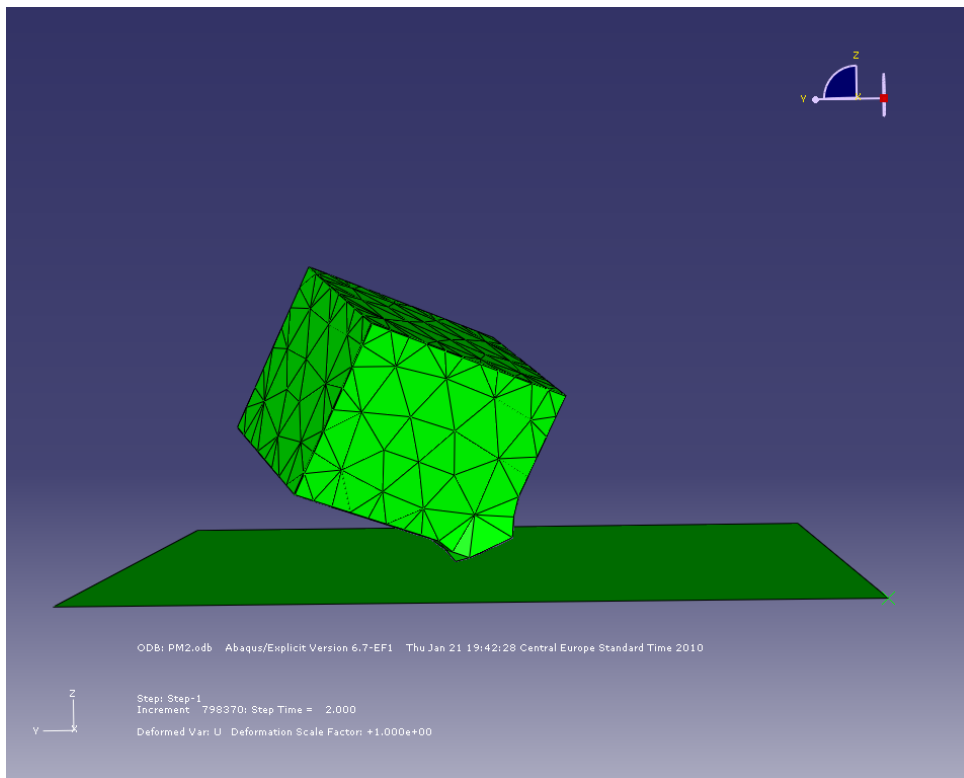
Slika 51: Prikaz poškodovanosti osnovnega modela - prerez zabojnika 0,5 m nad togo podlago.

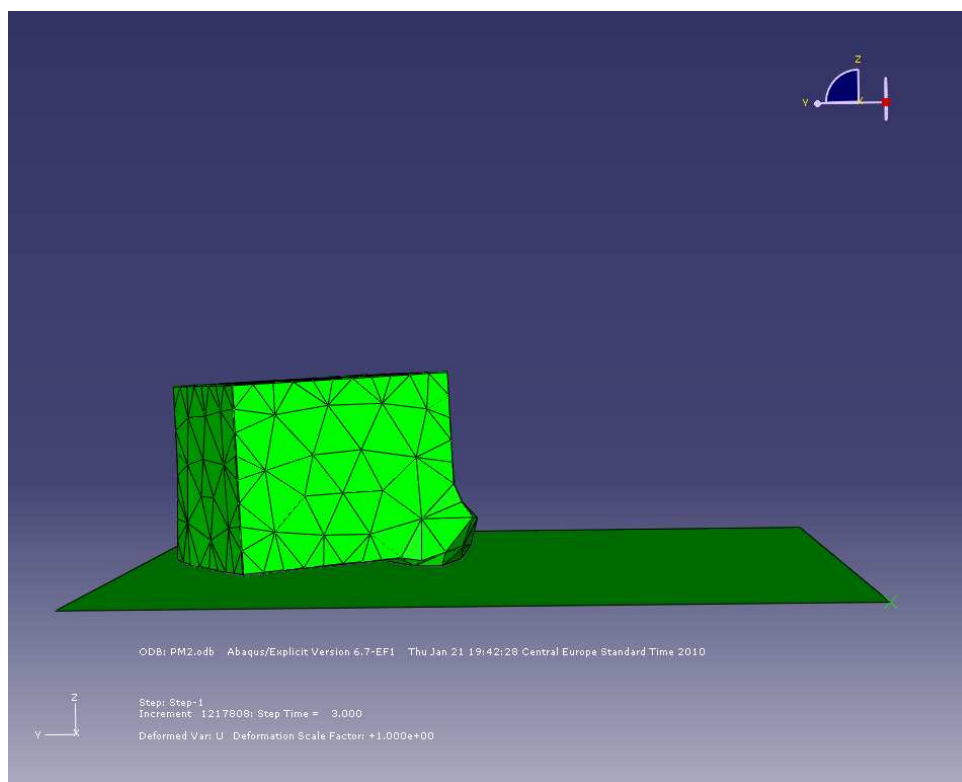


Slika 52: Prikaz poškodovanosti modela s porezanimi robovi - prerez zabojnika 0,5 m nad togo podlago.



Slika 53: Začetni položaj zabojnika.

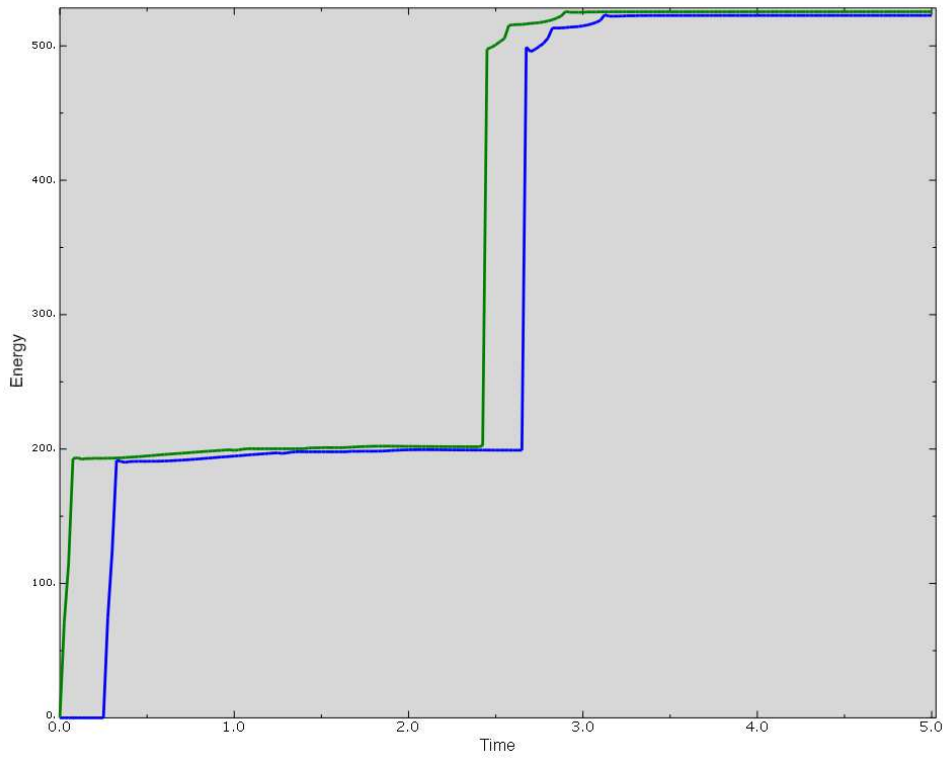
Slika 54: Položaj zabojnika v času $t = 1$ s.Slika 55: Položaj zabojnika v času $t = 2$ s.



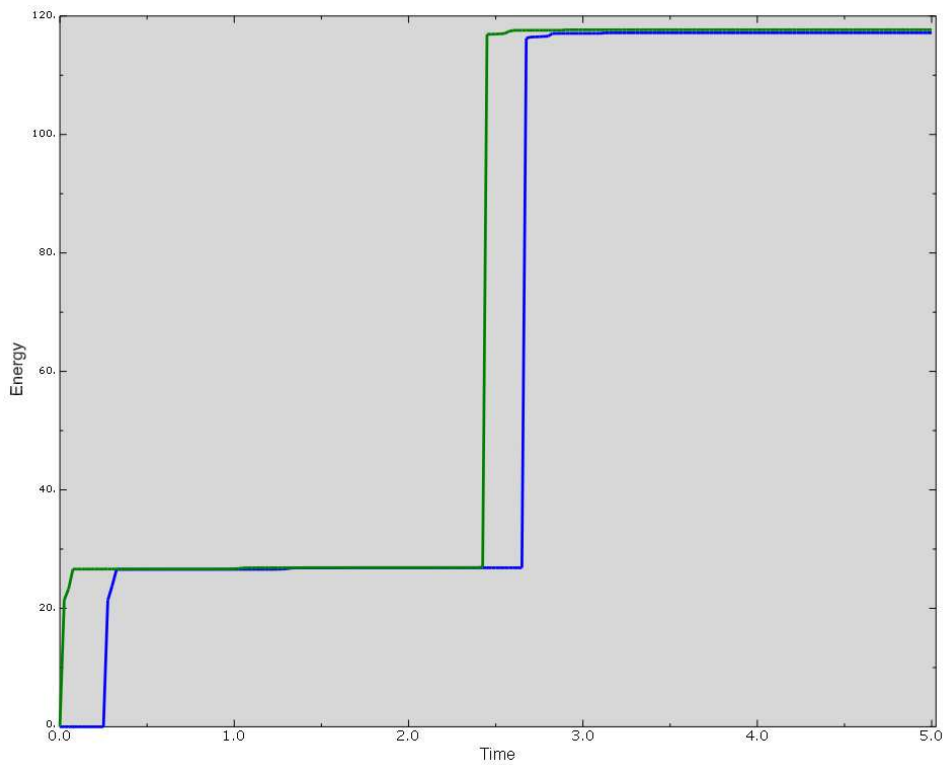
Slika 56: Položaj zabojnika v času $t = 3$ s.

vzrok zamika grafov energij. Enak je rezultat pri energiji, ki se disipira zaradi poškodovanosti materiala (slika 58) in ostalih energijah. Različna pa sta grafa zunanjega dela (slika 59). Do razlike pride, ker računalniški program Abaqus začne beležiti energijo od začetka simulacije. Čeprav imata oba modela pred trkom enako hitrost, je model, ki pade z višine, opravil določeno pot, ki se zapiše kot zunanje delo. Razlika med grafoma je enaka potencialni energiji in znaša 155 kJ. Do razlike pride tudi pri nerealni energiji zaradi numeričnih napak (slika 60). Ta energija je za razred manjša kot v prejšnjem primeru. Premaknitev zabojnika tik nad podlago in obremenitev z začetno hitrostjo, ne le časovno skrajša simulacijo, ampak tudi zmanjša velikost numerične napake, ki nastane v času padanja zabojnika. Poškodovanost zabojnika je na istih mestih in enakega obsega kot pri prejšnjem modelu (slika 61). Glede na grafe energij in parameter poškodovanosti materiala v tlaku, lahko potrdimo, da sta modela ekvivalentna.

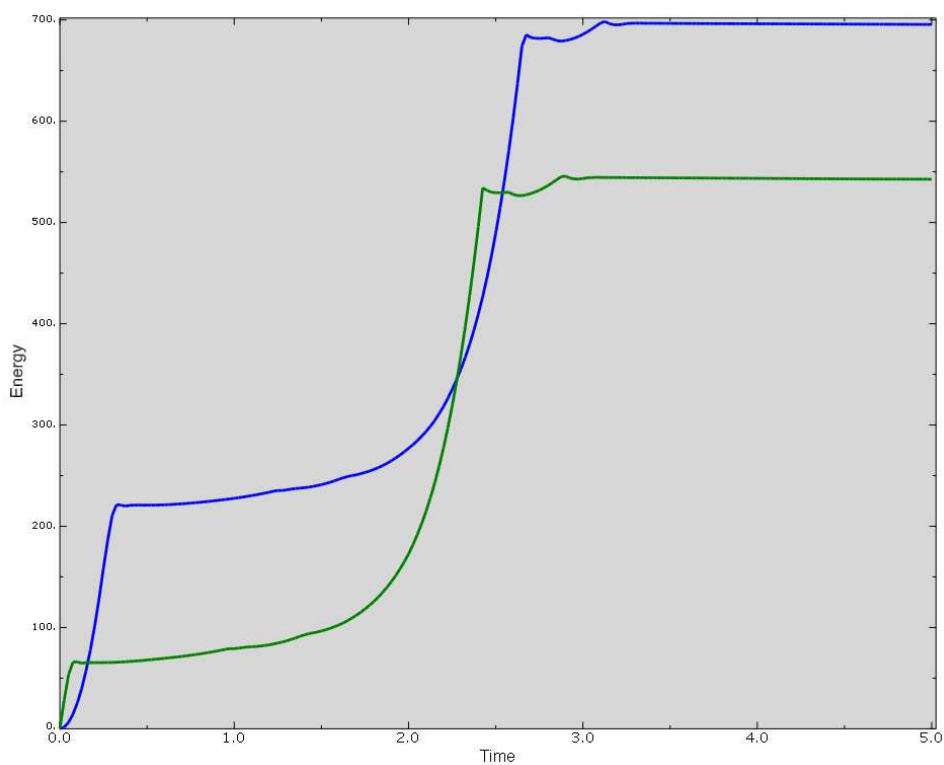
S preprostim modelom zabojnika smo dobili nekaj koristnih napotkov za modeliranje natančnega modela. Za natančne rezultate rabimo veliko število končnih elementov. Velikost numeričnih napak se bistveno zmanjša, če porežemo robove zabojnika. S tem dobimo realnejši primer trka. Z glajenjem robov smo primorani zamenjati obliko končnih elementov. Obremenitev zabojnika s hitrostjo, ki jo ima tik pred trkom in postavitev zabojnika tik nad togo podlago, skrajša čas



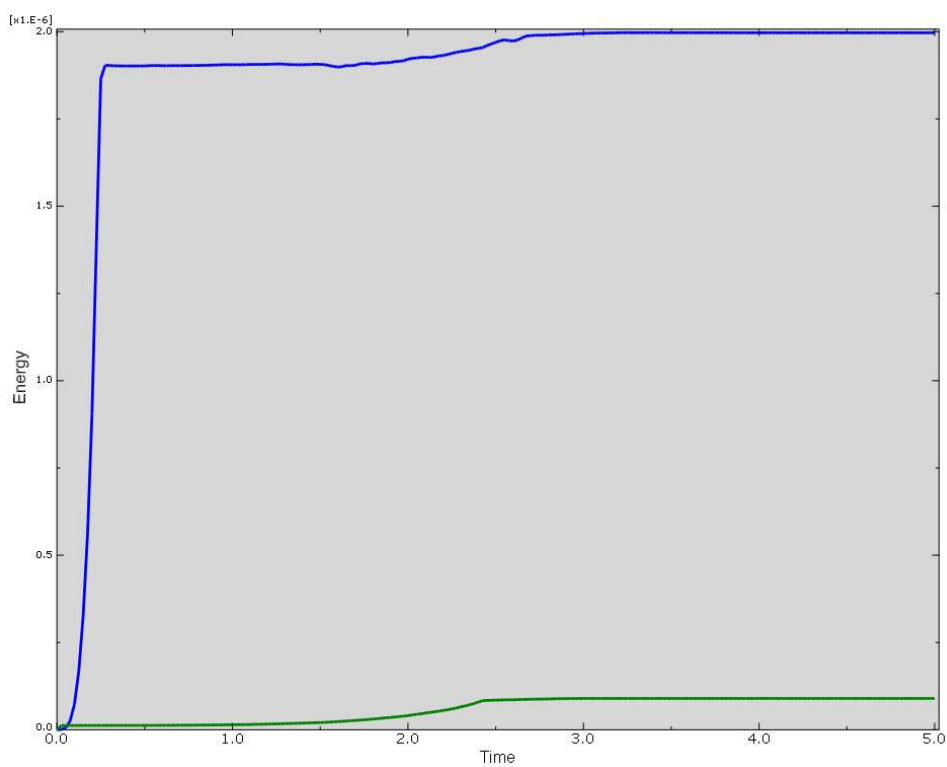
Slika 57: Primerjava notranjih energij (modra - padec z višine, zelena - začetna hitrost).



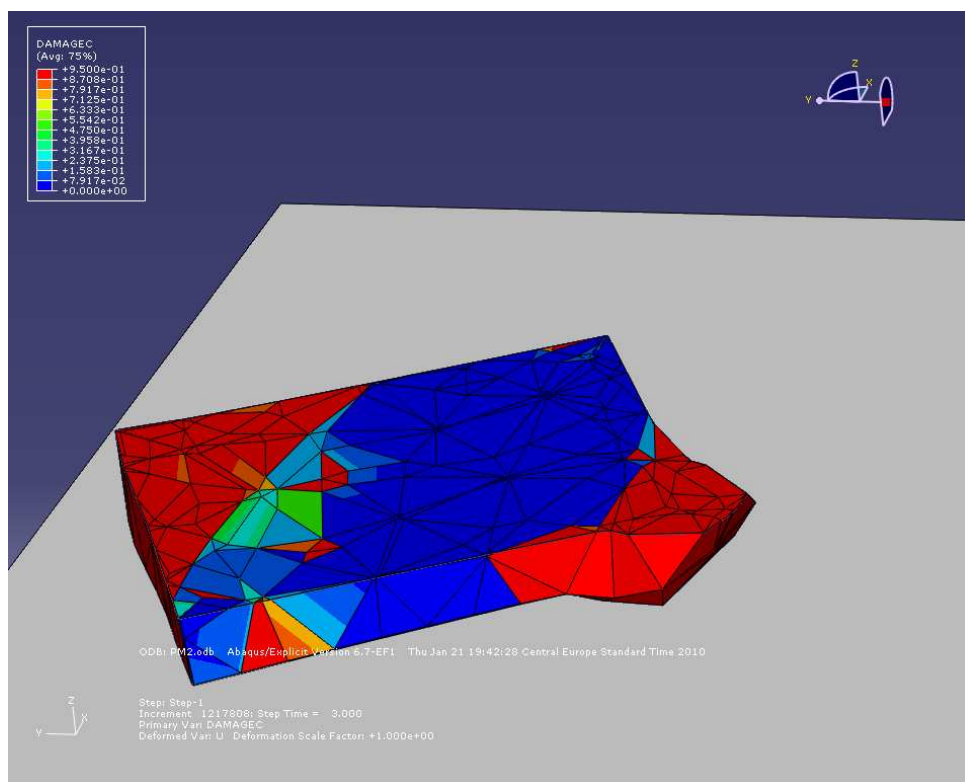
Slika 58: Primerjava energij, ki se disipirajo zaradi poškodovanosti materiala (modra - padec z višine, zelena - začetna hitrost).



Slika 59: Primerjava zunanje dela (modra - padec z višine, zelena - začetna hitrost).



Slika 60: Primerjava nerealnih energij (modra - padec z višine, zelena - začetna hitrost).



Slika 61: Prikaz poškodovanosti modela z začetno hitrostjo - prerez zabojnika 0,5m nad togo podlago.

izračuna simulacije in zmanjša velikost numeričnih napak. V naslednjem poglavju bomo vse koristne informacije, ki smo jih dobili z modeliranjem stene in preprostega zabojnika, uporabili na natančnem modelu.

4.2 Natančen model zabojnika

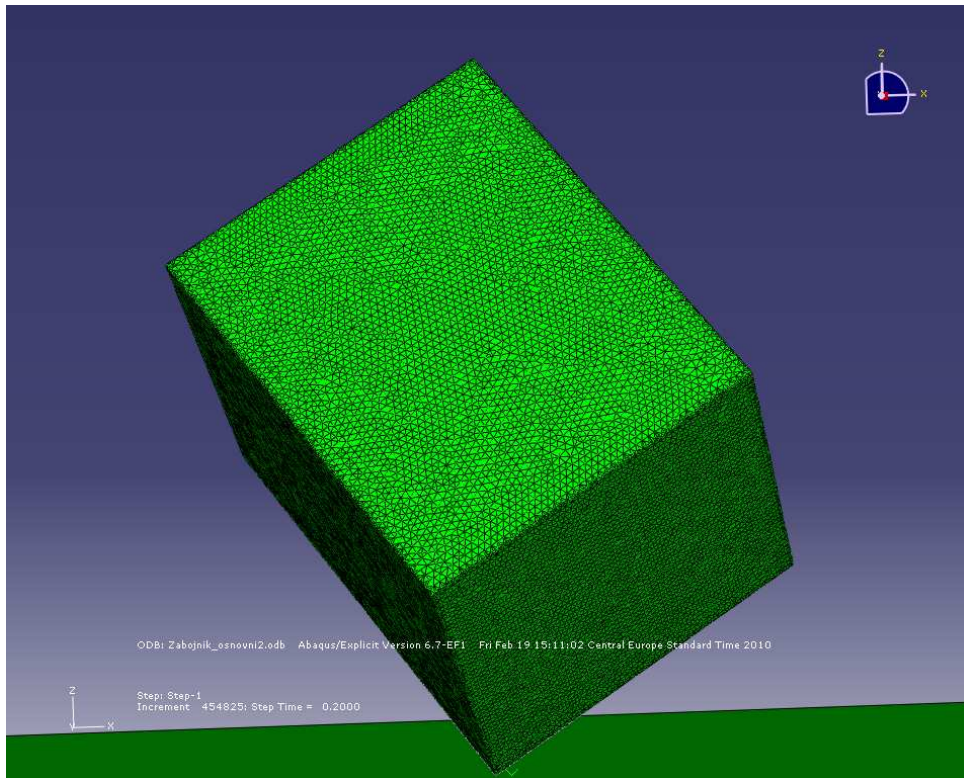
V prejšnjih razdelkih smo dobili določene informacije o padcu zabojnika in spoznali ukaze v računalniškem programu Abaqus. Dobljeno znanje bomo uporabili pri modeliranju natančnega modela zabojnika. Rezultati natančnega modela bodo primerljivi z dejanskim padcem zabojnika. Spoznanja se naknadno lahko prenese v prakso. Pri natančnem modelu bomo posebej modelirali betonski zaboжник in posebej njegovo notranjost. Najprej bomo naredili model betonskega zabojnika in mu v drugem primeru dodali še armaturo. Iz rezultatov bomo videli kako armatura vpliva na obnašanje zabojnika pri trku. Pri obeh modelih bomo opazovali poškodbe zabojnika.

4.2.1 Betonski model zabojnika

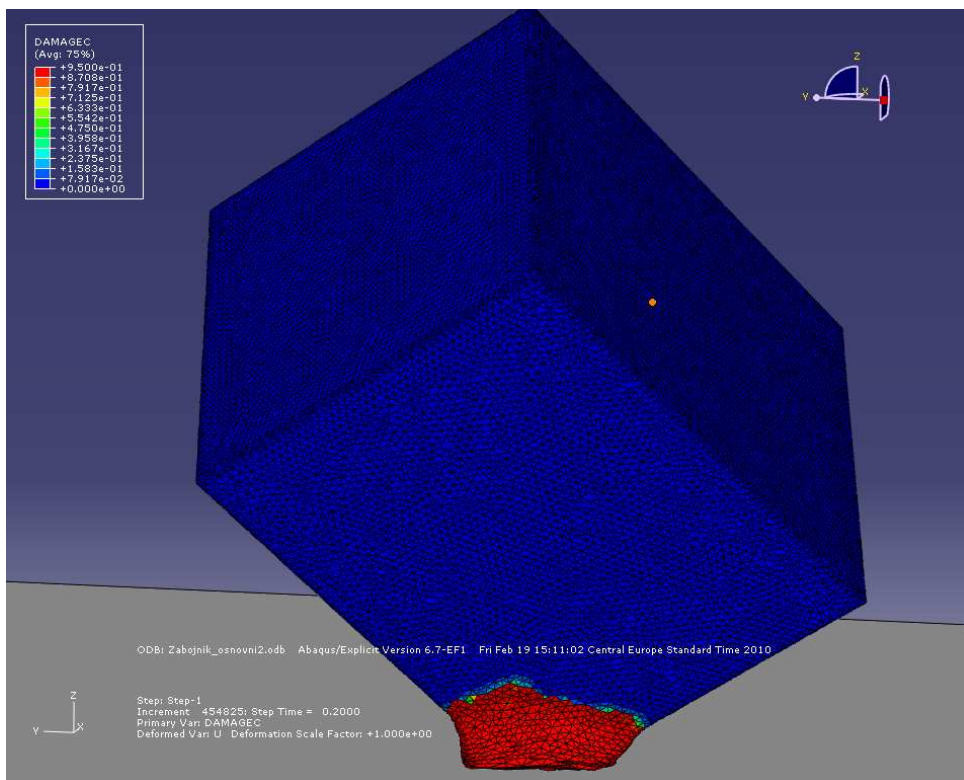
Zabojnik ima znane dimenzije: višina 3,25 m, dolžina in širina 2,55 m. Stene zabojnika in pokrov so debeline 20 cm. Stik med pokrovom in stenami zabojnika ni modeliran posebej, ampak kot bi pokrov bil vlit istočasno z ostalim betonom in ne naknadno pritrjen na zabojnik. V prejšnjem razdelku smo ugotovili, da k zmanjšanju numeričnih napak veliko pripomore zgladitev robov zabojnika, zato tudi pri natančnem modelu porežemo robove. Uporabili bomo enak materialni model beton, kot v vseh dosedanjih simulacijah. Lastnosti betona so naslednje: specifična teža $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$, elastični modul $E = 3200 \text{ kN/cm}^2$, Poissonov količnik $\nu = 0,2$, dilatacijski kot $\psi = 36^\circ$, ekscentričnost plastičnega toka $\varepsilon = 0,1$, začetno razmerje med napetostjo tečenja pri dvoosnem tlačnem napetostnem stanju in napetostjo pri meji tečenja pri enoosnem tlačnem napetostnem stanju $\frac{\sigma_{b0}}{\sigma_{c0}} = 1,16$, razmerje, ki določa razliko med mejo tečenja v tlaku in mejo tečenja v nategu $K_c = \frac{2}{3}$ in koeficient viskoznosti materiala $\mu = 0$. Notranjost bomo modelirali z elastičnim materialom naslednjih karakteristik: specifična teža $\gamma = 30 \text{ kN/m}^3$, elastični modul $E = 3200 \text{ kN/cm}^2$ in Poissonov količnik $\nu = 0,2$. Zabojnik postavimo tik nad togo podlago in ga obremenimo z začetno hitrostjo $v_0 = 2,45 \text{ m/s}$. S tem zmanjšamo velikost numeričnih napak in skrajšamo trajanje računa simulacije. Poleg začetne hitrosti v_0 na zabojnik deluje tudi gravitacijska sila. Sama simulacija traja 0,2 s. V tem času se zgodi večina začetnega trka. Koeficient trenja med zabojnikom in togo podlago je 0,3. Trajanje simulacije smo skrajšali zaradi dolgotrajnega računa simulacije. Osredotočili se bomo na obnašanje zabojnika v začetnem trku, poznejše prevračanje pa bomo izpustili. Zabojnik je sestavljen iz več kot 300000 končnih elementov (slika 62), kar je razlog za dolg račun. Zunanja, 5 cm debela, plast zabojnika je sestavljena iz štirivozliščnih končnih elementov, zaradi geometrije zabojnika. Notranja plast zabojnika in vsebina pa sta razdeljeni na osemvozliščne končne elemente, saj ta vrsta končnih elementov omogoča vstavitev armature v model.

Slika 63 prikazuje poškodovanost zabojnika pri trku s togo podlago. Rdeče je obarvan popolnoma poškodovan material. Na sliki 64, ki prikazuje detajl vogala, vidimo, da je celoten vogal poškodovan vse do vsebine zabojnika, ki je prikazana z belo barvo. V primeru skladiščenja radioaktivnih snovi je to zelo nevarno. Notranjost zabojnika ostane nepoškodovana (slika 65).

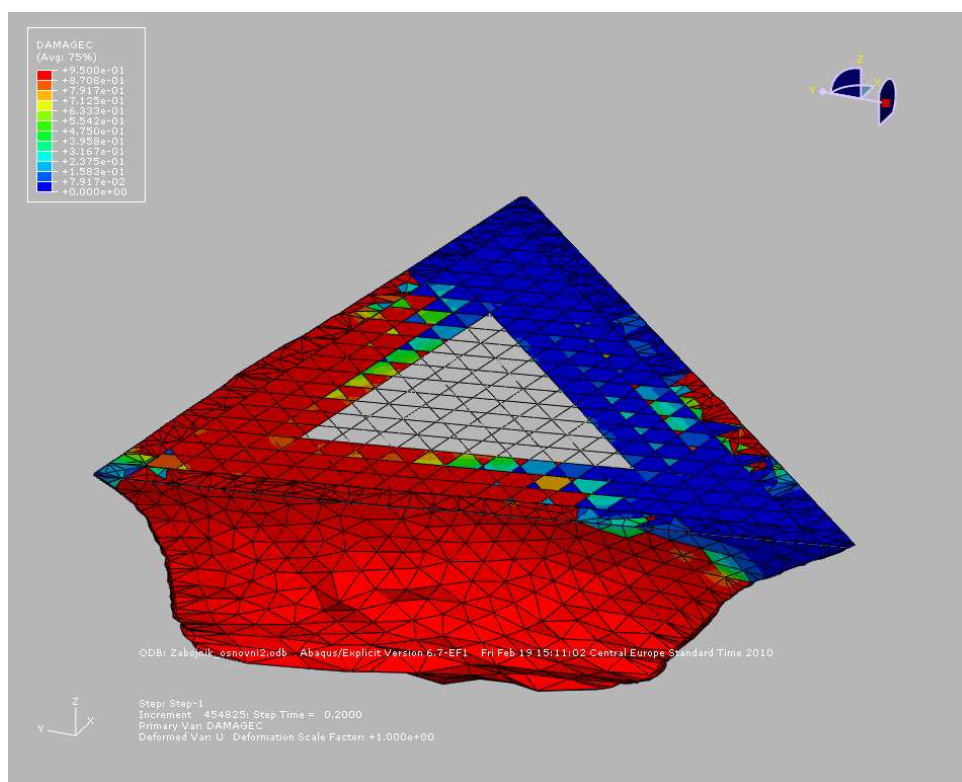
S slike 66 vidimo, da predstavlja energija, ki se disipira zaradi plastifikacije materiala, največji delež notranje energije. Veliko betona se poškoduje, zato tako visoka vrednost. Majhen delež notranje energije predstavlja tudi nerealna energija, ki nastane zaradi numeričnih napak. Ener-



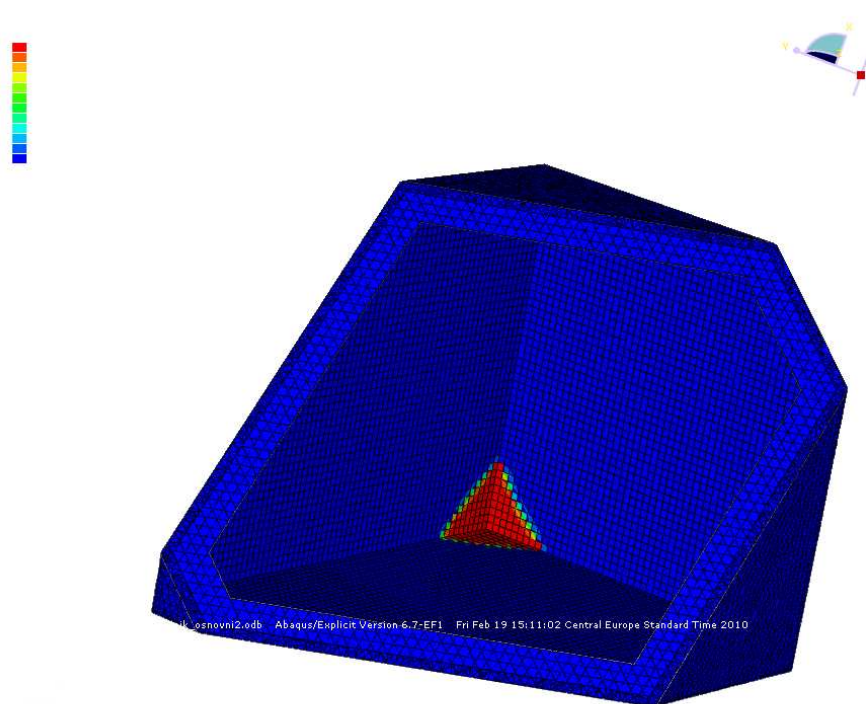
Slika 62: Gosta mreža končnih elementov.



Slika 63: Poškodovanost betonskega zabojnika.

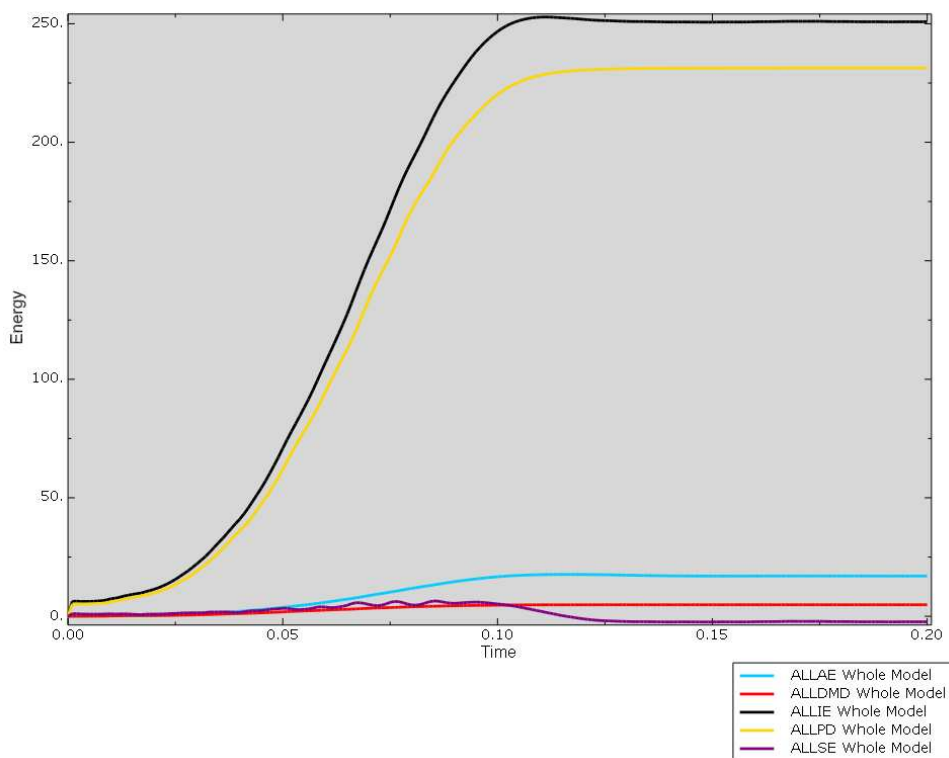


Slika 64: Detajl poškodovanega vogala.



Slika 65: Notranjost zabojnika je nepoškodovana.

gija, ki se disipira zaradi poškodovanosti materiala in deformacijska energija zaboynika sta majhni in k velikosti notranje energije doprineseta zelo malo.



Slika 66: Notranja energija zaboynika z energijami, ki jo sestavljajo.

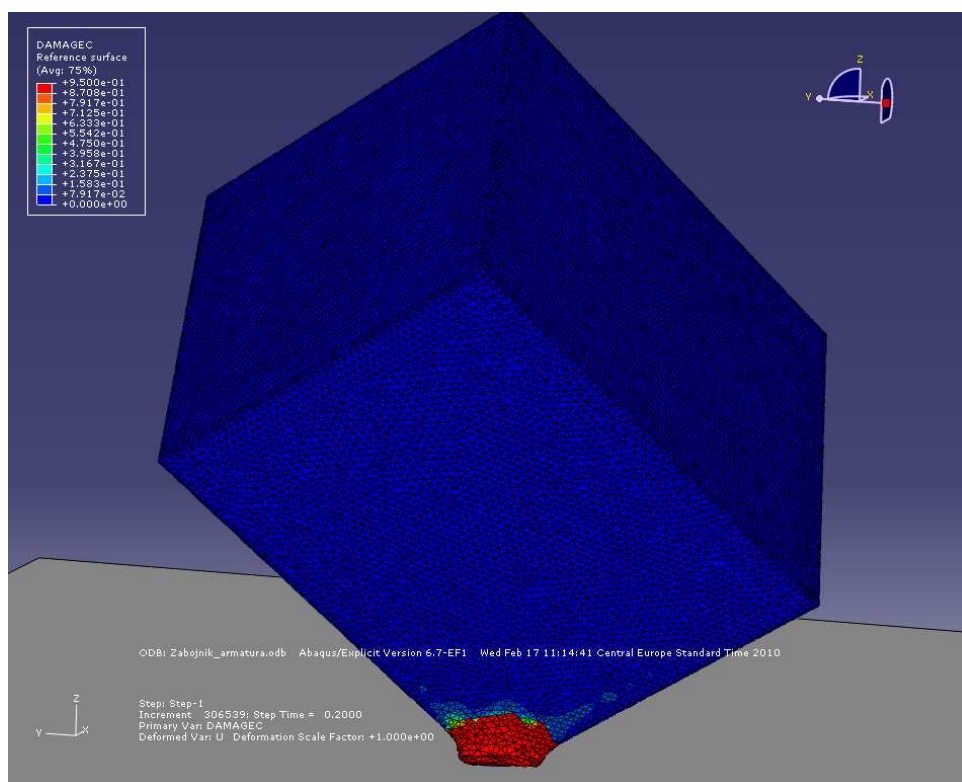
Vogal zaboynika se pri trku zelo poškoduje. Pri tako poškodovanem vogalu, beton odpade in vsebina zaboynika je izpostavljena zunanjemu okolju. Tega si ne želimo, zato je potrebno zaboynik tako spremeniti, da se stene zaboynika ne poškodujejo popolnoma po celotni širini. V naslednjem modelu bomo zaboynik ojačali z armaturo in preverili kako ta vpliva na poškodovanost zaboynika.

4.2.2 Armiranobetonski model zaboynika

Model armiranobetonskega zaboynika je enak betonskemu, le armaturo smo dodali. Materialni model betona in vsebine je enak, zaboynik je obremenjen z gravitacijo in začetno hitrostjo v_0 , razdelitev na končne elemente je enaka kot v prejšnjem primeru. Zaboyniku smo 5 cm od zunanje stranice dodali armaturo, ki jo sestavljajo palice prečnega prereza $A_p = 0,5 \text{ cm}^2$, postavljene na razdalji 5 cm. Palice so postavljene v dveh pravokotnih smereh, vzporedne robovom stranic. Uporabimo jeklo naslednjih lastnosti: specifična teža $\gamma = 78 \text{ kN/m}^3$, elastični modul E

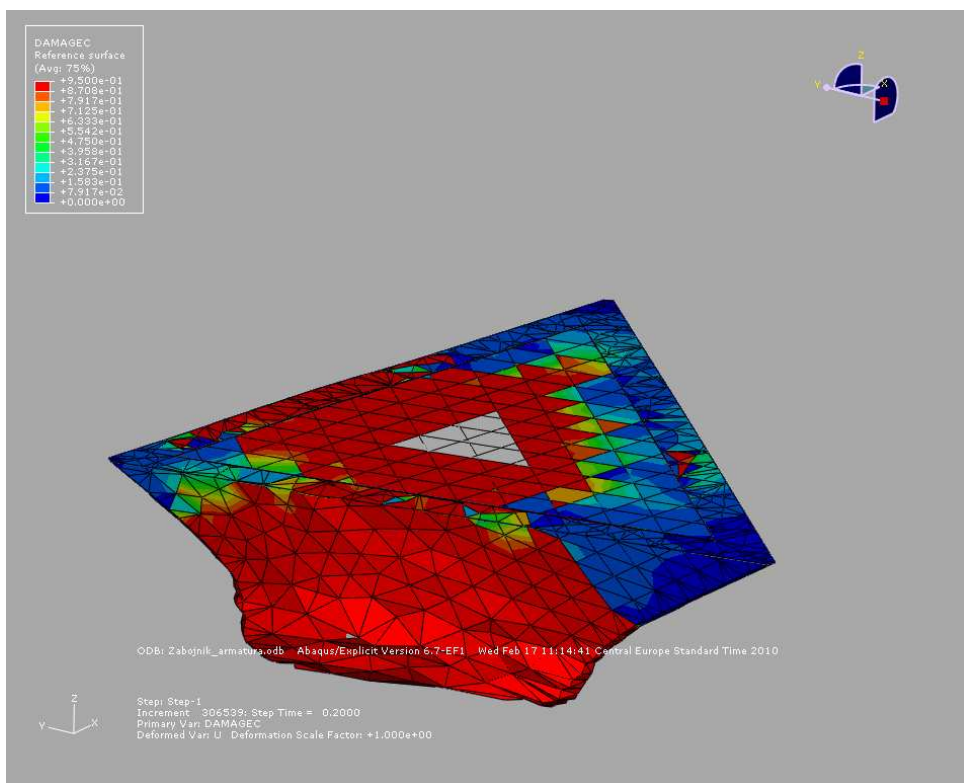
= 21000 kN/cm² in Poissonov količnik $\nu = 0,3$ in meja plastičnosti 40 kN/cm². Armatura je na zabojniki pritrjena z ukazom *Embedde Region*. Tako postavljena armatura objame celoten zabojniki in tako ustvari bolj kompakten zabojniki. Rezultati bodo pokazali, če je ukrep dober.

Na sliki 67 vidimo poškodovanost zabojnika. Območje, kjer je material popolnoma poškodovan je manjše v primerjavi z prejšnjim modelom. Detajl vogala (slika 68) to potrjuje, saj je del, ki prikazuje vsebino zabojnika (bela barva), manjši kot v prejšnjem primeru. Armatura je poskrbela, da se manjši del popolnoma poškoduje, vendar je poškodba še vedno tako velika, da je vsebina izpostavljena okolju. Za razliko od betonskega zabojnika, pa pride v tem primeru tudi do poškodovanosti notranjosti zabojnika (slika 69). Armatura poveča kompaktnost zabojnika, kar povzroči, da vsebina ob trku zaniha in poškoduje zabojniki. Poškoduje se sicer le notranja plast betona. Večina stene ostane nepoškodovane in ni nevarnosti, da bi bila vsebina izpostavljena okolju.

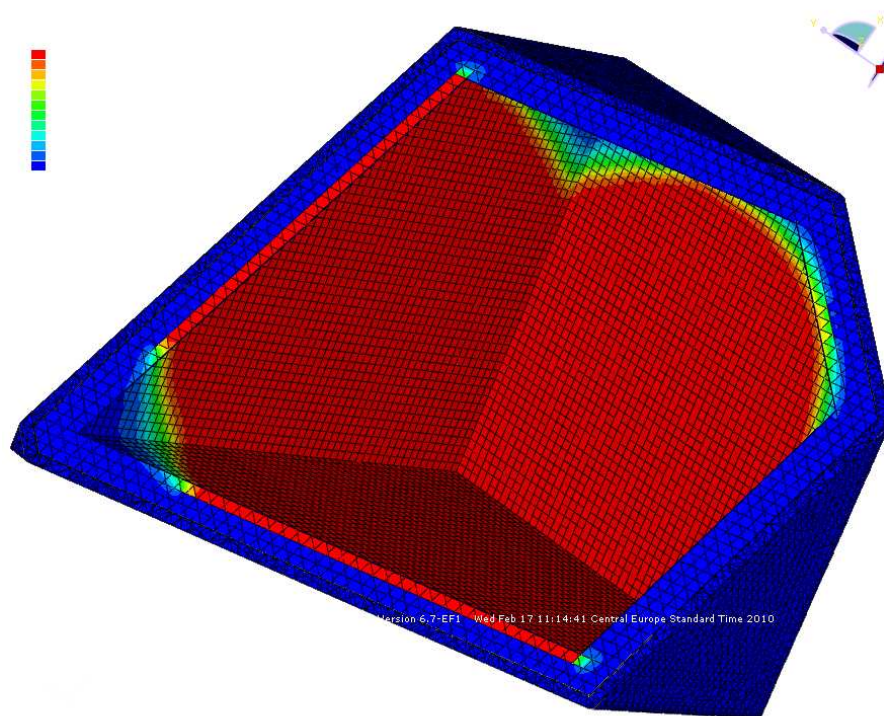


Slika 67: Poškodovanost armiranobetonskega zabojnika.

Največji delež notranje energije predstavlja energija, ki se disipira zaradi plastifikacije materiala, ostale tri energije pa predstavljajo majhen delež (slika 70). Manjše vrednosti energij v primerjavi s prejšnjim modelom dobimo zaradi manj poškodovanega zabojnika. Na sliki 71 vidimo, da je zunanje delo armiranobetonskega zabojnika manjše od betonskega zabojnika. Ar-

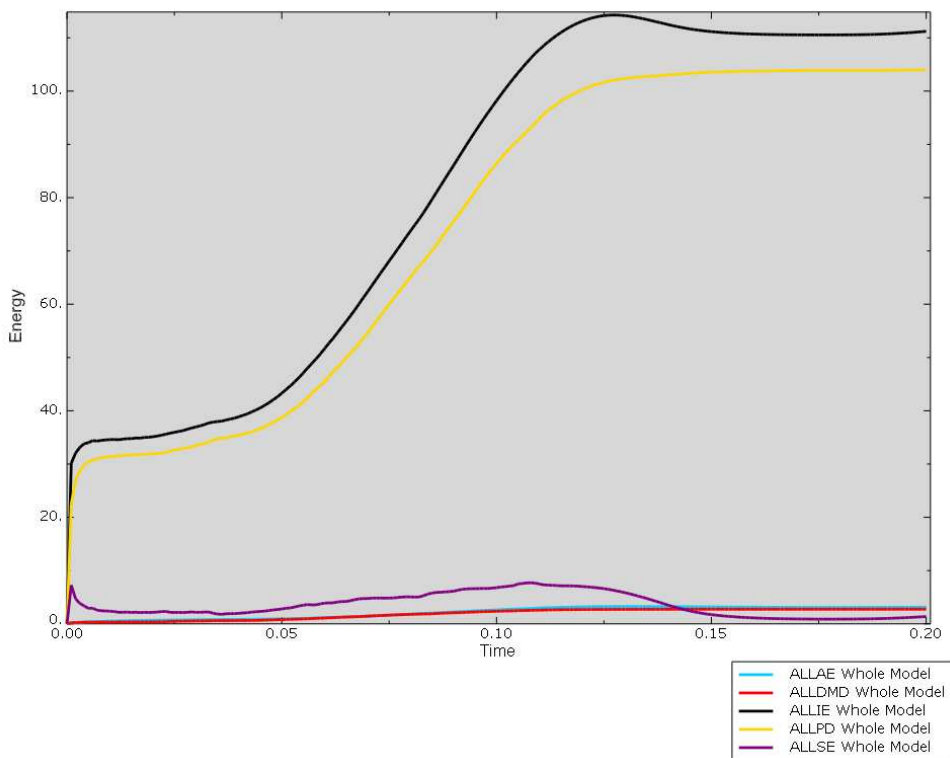


Slika 68: Detajl poškodovanega vogala.



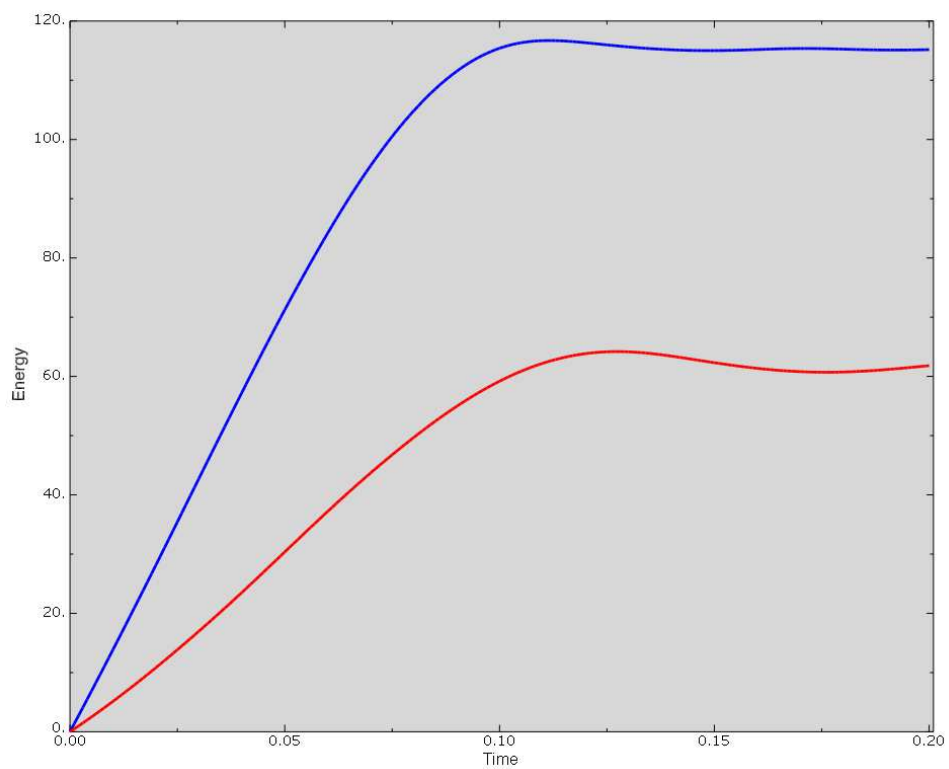
Slika 69: Notranjost zabojnika se poškoduje.

miranobetonski zaboju se manj stisne k tlom, zato točke zaboju opravijo krajšo pot, kar se odraža na manjšem zunanem delu.



Slika 70: Notranja energija zaboju in energije, ki jo sestavljajo.

Armatura poveča trdnost zaboju in posledično zmanjša njegovo poškodovanost. Udarec pri trku je tako močan, da se kljub armaturi betonska stena zaboju popolnoma poškoduje in vsebina je izpostavljena okolju. Pri skladiščenju radioaktivnih odpadkov so take poškodbe zelo nevarne in nezaželjene. Večja količina armature bi zmanjšala poškodbe vogala, vendar je tak ukrep malce nesmiseln, saj so največje poškodbe na vogalu in ne na stranicah zaboju. V vogalu so sile največje, zato je potrebno ta del ojačati. To lahko naredimo z dodatno armaturo v vogalu ali z zavarovanjem vogala s pločevino. S temi ukrepi preprečimo kršenje betona pri trku in tako ostane vsebina zaboju izolirana od zunanjega okolja.



Slika 71: Primerjava zunanjega dela (modra - betonski zabojnik, rdeča - AB zabojnik).

5 ZAKJUČEK

Za modeliranje padca zabojnika na togo podlago smo najprej morali spoznati računalniški program Abaqus. Osnovna numerična metoda za modeliranje trkov deformabilnih teles je tako imenovana eksplicitna dinamika, ki jo vključuje tudi izbrani program. Eksplicitna dinamika je tip numerične analize, ki upošteva inercijske sile in časovno spremenljivo obtežbo. Končni rezultati so vrednosti pomikov, hitrosti in pospeškov v diskretnih časovnih točkah, ki jih izračunamo po znanem postopku. Za stabilnost izračuna pa je potrebno zagotoviti dovolj majhne časovne intervale.

V programu Abaqus smo morali spoznati ukaze za modeliranje armiranobetonskih konstrukcij. V ta namen smo pripravili preprost model strižno obremenjene stene. Armaturo smo v konstrukcijo vključili z ukazom *Embedded region*, ki zagotovi prijemnost med betonskim delom stene in armaturo. Za boljše razumevanje podajanja armature smo naredili več različnih modelov stene, ki so se razlikovali v velikosti prereza armaturnih palic, v razmaku med palicami in v poziciji armature znotraj stene. Med sabo smo modele primerjali glede na pomik vrha stene. Rezultati so pokazali, da je pomik večji v primeru manjše količine armature in postavitve armature na tlačni strani stene ter manjši v primeru povečanja količine armature in armiranja stene na natezni strani. Preizkusili smo tudi različne hitrosti nanosa obtežbe in spoznali, da pri hipnem nanosu pride do večjih pomikov kot pri počasnejšem, saj pridejo dinamični vplivi veliko bolj do izraza.

Izračun simulacije padca zabojnika je časovno zelo potraten, zato smo prve simulacije izvedli na preprostem modelu. Na ta način dobimo osnovo za modeliranje natančnega modela. Hitreje lahko simuliramo posamezne spremembe in ovrednotimo dobljene rezultate. Spremembe, ki dajo pozitivne rezultate uporabljamo v nadaljnjih simulacijah, ostale pa izločimo. Pri začetnem modelu ugotovimo, da zelo natančna geometrija zabojnika, proizvede velike numerične napake. Zato malo porežemo robove, da niso tako ostri, kar da veliko realnejši primer. Ta sprememba pogojuje tudi zamenjavo oblike končnih elementov. Pri tem modelu pridejo v poštev štirivozliščni tertaedri končni elementi. Numerične napake so v tem modelu veliko manjše. Dodatni ukrep za skrajšanje izračuna simulacije je postavitve zabojnika tik nad togo podlago in obremenitev z začetno hitrostjo. Rezultati so pokazali, da je tak model ekvivalenten padcu z višine.

Pri natančnem modelu povečamo število končnih elementov, kar nam da natančnejši končni rezultat. Za manjšo numerično napako zaboju porežemo robove, za skrajšanje izračuna simulacije pa ga postavimo tik nad podlago in obremenimo z začetno hitrostjo. Ker bi celotna simulacija trajala preveč časa, smo jo omejili le na 0,2 s, ko je prvotni trk s podlago končan. Pri betonskemu modelu je območje popolnoma poškodovanega materiala kar veliko, zato v drug model vstavimo armaturo v vse stranice zaboju. Rezultati so boljši in območje poškodovanosti zaboju se zmanjša. Kljub izvedenemu ukrepu je vogal še vedno zelo poškodovan, zato bi ga bilo potrebno ojačati. Lahko bi uporabili dodatno armaturo v območju vogala in s tem ojačali vogal ali ga zaščitili z zunanje strani s pločevino. Do največjih poškodb pride na vogalih in robovih, zato bi mogoče bil dober ukrep, če bi na teh mestih namestili kovinsko vez, ki bi ščitila zaboju pred udarci in ga naredila bolj kompaktnega.

VIRI

Hibbitt, Karlsson, Sorensen. 2007. ABAQUS/Standard Users Manual. Version 6.7. Pawtucket, RI, HKS Inc. <http://abaqus.civil.uwa.edu.au:2080/v6.7/> (februar 2010).

Brank, B., Dujc, J. 2008. Numerična analiza padca armiranobetonskega zabojnika z radioaktivnim materialom - grobi izračun, Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG, IKPIR: 22 str.