

Numeričko modeliranje ponašanja demontažne posmične veze spregnutih nosača izvedenih od hladno oblikovanog čelika i betona

Žuvelek, Vlaho; Ćurković, Ivan

Source / Izvornik: **Zbornik radova devetog skupa istraživača iz područja građevinarstva i srodnih tehničkih znanosti, 2022, 107 - 116**

Conference paper / Rad u zborniku

Publication status / Verzija rada: **Published version / Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:237:013533>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)



**NUMERIČKO MODELIRANJE PONAŠANJA
DEMONTAŽNE POSMIČNE VEZE SPREGNUTIH
NOSAČA IZVEDENIH OD HLADNO OBLIKOVANOG**
Numerical study on behaviour of demountable
shear connection cold-formed steel-concrete
composite beam

Vlaho Žuvelek¹, Ivan Ćurković¹

(1) Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, vlaho.zuvelek@grad.unizg.hr

Sažetak

Istraživanja su pokazala da se primjenom spregnutih sustava izvedenih od hladno oblikovanog čelika i betona postižu dodatne prednosti u odnosu na tradicionalna rješenja. Stoga su u ovom radu promatrana dva sustava gdje se jedan sustav sastoji od nosača koji je izveden od hladno oblikovanih profila (HOP) s valovitim hrptom sastavljenih uz pomoć točkastog zavarivanja i betonske ploče koji su međusobno povezani demontažnom vijčanom vezom. U odnosu na prvi, drugi sustav ne sadrži valoviti hrpat, nego je nosač izveden od HOP *back-to-back* načinom. Numeričkom analizom uspoređena su posmična ponašanja dvaju sustava što predstavlja podlogu za buduća eksperimentalna istraživanja. U radu je obuhvaćeno ponašanje sustava koji sadrže dva vijka postavljena u paru po rebru ili jedan vijak postavljen naizmjenice. Rezultati numeričke analize ukazuje da sustav s valovitim hrptom rezultira većom posmičnom otpornošću, dok općenito modeli koji sadrže dva vijka u paru po rebru osiguravaju veću krutost posmične veze, ali i reduciranu duktilnost u odnosu na sustav s jednim vijkom postavljenim naizmjenice.

Ključne riječi: spregnuti nosač, hladno oblikovani čelik, točkasti zavari, demontažna posmična veza

Abstract

Research shows that composite systems made by cold-formed steel (CFS) and concrete achieve additional advantages over traditional solutions. Therefore, in this paper, two systems were observed where one system consists of built-up CFS beams with corrugated web, connected by spot-welds and concrete slab connected by demountable shear connection. The second system, compared to the first system, doesn't contain a corrugated web, but the beam is made of back-to-back CFS. The numerical analysis compared the shear behaviour of the two systems, which is the basis for future experimental research. The paper covers the behaviour of the system if it contains two bolts placed in the rib or one bolt in a staggered position. The results of the numerical analysis indicate that the first system results in higher shear strength, while models containing two bolts in the rib provide greater shear stiffness but also reduced ductility relative to one bolt placed in a staggered position.

Keywords: composite beam, cold-formed steel (CFS), spot-weld, demountable shear connector

1. Uvod

Spregnuti konstrukcijski sustavi jedni su od najisplativijih u građevinarstvu jer osim što osiguravaju visoku razinu konstrukcijske učinkovitosti istovremeno omogućavaju kraće vrijeme izgradnje. Prednosti spregnutih konstrukcijskih sustava mogu se i dodatno unaprijediti ukoliko se primjene novi sustavi koji su izvedeni od inovativnih hladno oblikovanih čeličnih nosača s valovitim hrptom, te su međusobno spojeni s betonskom pločom koristeći inovativni tip posmične veze [1]–[4]. HOP doprinose prednostima koje se očituju kroz smanjenje visine ploče, slobodu oblikovanja poprečnog presjeka, jednostavnu tehnologiju izrade, fleksibilnosti montaže na licu mjesta ili u radionici [5]. Posmična veza predstavlja važan segment konstrukcijskog ponašanja spregnutih nosača od čelika-betona koji će omogućiti međudjelovanje pojedinih dijelova. Ponašanje same posmične veze ovisi o stupnju posmične veze koji se može definirati kao omjer posmične otpornosti spojnih sredstava u odnosu na otpornost najslabije komponente spregnutog presjeka (u ovom slučaju čelične grede ili betonske ploče). Unutar Europskih normi [6] standardizirana je jedina vrsta posmične veze koja se ujedno danas i najčešće koristi, a ostvaruje se primjenom zavarenih moždanika s glavom. Detaljan kronološki pregled posmičnih veza koje omogućuje demontažu spregnutog sustava nedavno je prikazan u radu [7]. Jakovljević i dr. [7] ukazuju da postoje veliki problemi vezani za otpornost i duktilnost različitih demontažnih posmičnih veza koje zahtijevaju daljnje istraživanje. Na osnovu svega navedenog, vidljivo je da još uvijek postoji potreba za istraživanjem cjelokupnog ponašanja HOP-a u spregnutima sustavima kao i ponašanja demontažne posmične veze. Iz tog razloga, uspostavljen je istraživački projekt LWT-FLOOR kojem je jedan od ciljeva istražiti ponašanje posmične veze između čeličnog profila i armiranobetonske ploče kod spregnutih nosača izvedenih od hladno oblikovanih profila (HOP).

2. Numerički modeli

2.1. Vrsta i geometrija modela

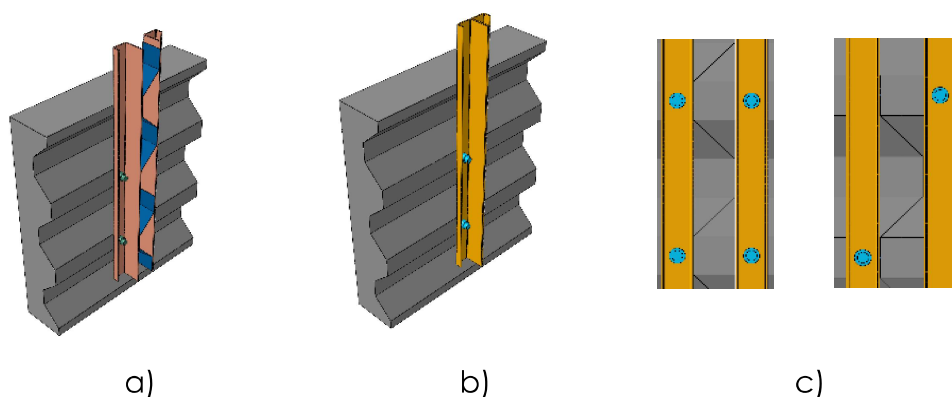
Trodimenzionalni modeli razvijeni su uz pomoću računalnog programa ABAQUS/CAE. Zbog same složenosti modela korišten je ABAQUS Explicit [8] kako bi se ostvarila uspješna konvergencija. Sustav sa valovitim hrptom je prikazan na Slici 1.(a), dok sustav sastavljen

od HOP *back-to-back* načinom na Slici 1.(b). Drugim riječima, sustav na Slici 1. (b) predstavlja sustav izveden od hladno-oblikovanih C profila spojenih u području hrpta pomoću točkastog zavarivanja. Vijčana veza je ostvarena primjenom vijaka s ugrađenom maticom u betonskoj ploči. Upotrebom takve vrste vijaka omogućuje se kontroliranje rotacije vijka i njegovog pomaka tokom opterećivanja [7]. U ovom radu korišteni su vijci promjera 12 i 16 mm. S obzirom da će u eksperimentalnom ispitivanju biti korišteni vijci sa navojem čiji je radijus u području navoja reduciran, u modelima je na mjestu navoja između matica primijenjen reducirani radijus koji iznosi 10.4 mm za M12 i 14.1 mm za M16. Kao što je prethodno spomenuto, u svakom sustavu promatrane su dvije pozicije vijaka, u paru i naizmjenice, Slika 1. (c). U modelima su korišteni HOP dimenzija 120×47×3 mm i kvalitete čelika S350GD, dok su profilirani lim betonske ploče i valoviti hrpat dimenzija, redom 720×600×1 mm i 780×120×1.25 mm, te kvaliteta čelika DX51D. Armiranobetonska ploča je dimenzija 720×600×140 mm i modelirana je s klasom betona C20/25 uz armaturnu mrežu Q524. Tablica 1. prikazuje oznake svih 8 modela koji su razmatrani u ovom radu te vrstu i poziciju primijenjenih vijaka. Modeli koji sadrže oznaku 'W' predstavljaju modele sa valovitim hrptom.

Tablica 1. Prikaz modela razmatranih u radu

Naziv modela	Vijci	Pozicija vijaka	Naziv modela	Vijci	Pozicija vijaka
M1W_1	M12	u paru	M2W_1	M16	u paru
M1W_2	M12	naizmjenice	M2W_2	M16	naizmjenice
M1_1	M12	u paru	M2_1	M16	u paru
M1_2	M12	naizmjenice	M2_2	M16	naizmjenice

Za HOP, betonsku ploču i vijke upotrijebljeni su volumni konačni elementi (C3D8), dok su profilirani lim i valoviti hrpat modelirani s plošnim konačnim elementima (S4R). Armaturna mreža u betonskoj ploči modelirana sa štapnim konačnim elementima (T3D2). Kako bi se optimiziralo trajanje numeričke analize, ali ipak postigli točni numerički rezultati, provedena je analiza osjetljivosti mreže ovisno o njezinoj veličini. Na kraju, odabrane veličine mreže bile su 10 mm za beton, profilirani lim i valoviti hrpat, 25 mm za armaturnu mrežu, 2 mm za vijke i 3 mm za CFS profile.



Slika 1. Numerički modeli: a) s valovitim hrptom; b) bez valovitog hrpta; c) položaj vijaka

2.2. Mehanička svojstva materijala

2.2.1. Čelik

U modelima je usvojena bilinearna krivulja za radni dijagram čelika sukladno EN 1993-1-5 Annex C [9]. Svi čelični elementi u modelima sadrže modul elastičnosti od 210 GPa, Poisson-ov koeficijent od 0.3 i gustoću čelika od 7850 kg/m³. Mehanička svojstva čelika korištenih u modelu prikazane su u Tablici 2.

Tablica 2. Mehanička svojstva čelika

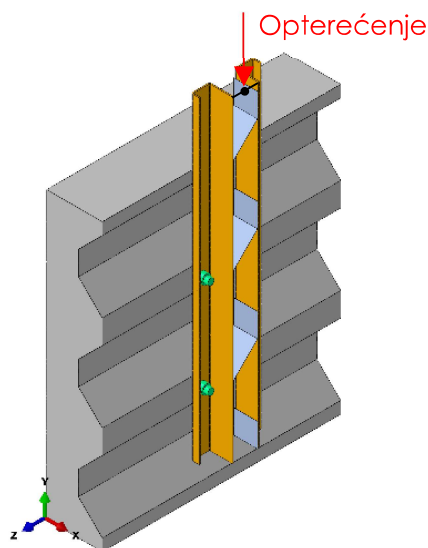
Čelik	f_y (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)
DX51D	270	325
S350GD	350	420
B500B	500	500
8.8	640	800

2.2.2. Beton

Zbog što točnijeg prikaza ponašanja armirano betonske ploče korišten je takozvani *concrete damaged plasticity model* (CDP). CDP model se zasniva na definiraju svojstava dvaju glavnih mehanizama otkazivanja betona tj. raspucavanje u vlak u i drobljenje u tlaku. Parametri potrebni za definiranje takvog ponašanja preuzeti su iz [10] uz iznimku kuta dilatacije od 31° prema [11]. Za određivanje svih potrebnih parametara iz rada [10] korištena je gustoća od 2400 kg/m³.

2.3. Kontakti, rubni uvjeti i unos opterećenja

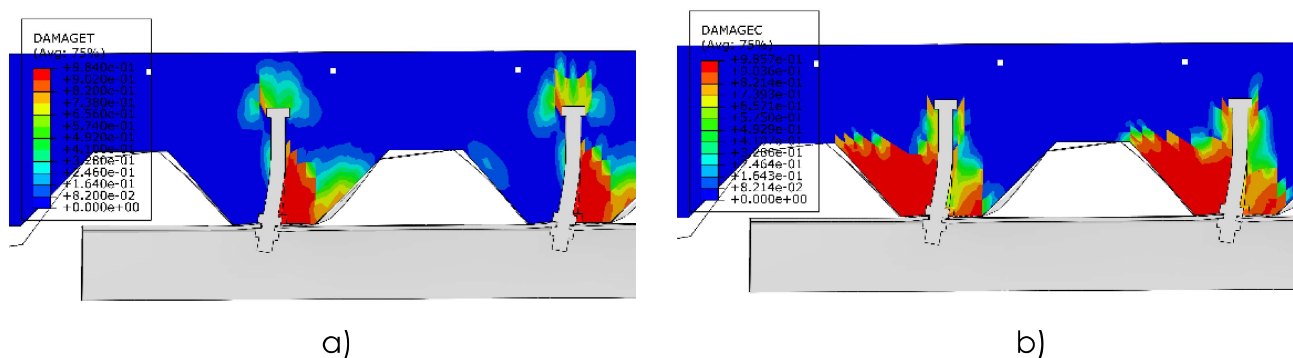
Kontaktno ponašanje između pojedinih elemenata razmatranih sustava ostvareno je primjenom takozvanih *surface-to-surface* i *general contact* opcija u Abaqus software-u [8] koje su definirane tako da sadrže normalno i tangencijalno ponašanje. Kod normalnog ponašanja u modelima onemogućeno je međusobno prodiranje jednog elementa u drugi, dok se tangencijalnim ponašanjem omogućuje trenje između pojedinih elemenata koje se definira koristeći koeficijent trenja koji je u ovom radu usvojen s vrijednošću od 0.3. Točkasti zavari su modelirani kao krute točke kako bi se spriječilo neželjeno otkazivanje istih. Unos opterećenja ostvaren je u obliku zadavanja jednolikog pomaka u vertikalnom smjeru (Y smjeru) u vrhu HO nosača, te iznosi ukupno 10 mm. Primijenjeni su simetrični rubni uvjeti na sredini svakog HO C profila, dok se oslanjanje uzorka ostvaruje preko donjih ploha armiranobetonske ploče gdje su te ravnine modelirane kao oslonci sa spriječenim pomacima u svim smjerovima. Na mjestu unosa opterećenja, onemogućena je translacija u x i z smjeru te rotacija oko istih osi kako bi se izbjeglo izbočivanje profila na mjestu unosa opterećenja.



Slika 2. Prikaz modela s položajem unosa opterećenja

3. Rezultati numeričkih analiza

Na osnovu dobivenih rezultata u svim modelima uočen je isti mod otkazivanja tj. otkazivanje betona gdje dolazi do drobljenja betona i stvaranje pukotina oko posmičnog spojnog sredstva, Slika 2.



Slika 3. Mod otkazivanja betona: a) drobljenje betona; b) vlačne pukotine

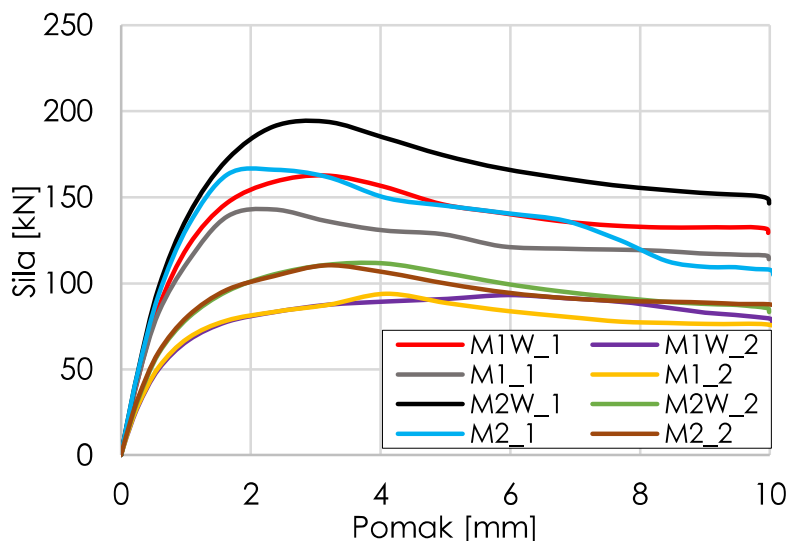
Dobiveni numerički rezultati uspoređeni su s karakterističnim vrijednostima koje su izračunate prema izrazima danima u Eurocode-u, EN 1993-1-8 [12] i EN 1994-1-1 [6], a prikazane su u Tablici 3. Navedene vrijednosti uključuju otpornost po omotaču rupe HOP profila ($F_{b,Rk}$), otpornost poprečnog presjeka HOP profila (N_{Rk}), otpornost posmične veze u čeliku ($P_{Rk,S}$) ili u betonu ($P_{Rk,C}$) sa i bez faktora redukcije, k_t . S obzirom da su rebra betonske ploče postavljena okomito na HOP, potrebno je izračunati faktor redukcije k_t kojim se dodatno može smanjiti otpornost posmične veze. Za odabranu geometriju profiliranog lima betonske ploče, faktor redukcije za modele koji sadrže dva vijka u paru po rebro iznosi 0.58, dok za vijke postavljene naizmjenice 0.81 sukladno izrazima danima u EN 1994-1-1 [6]. Za usporedbu numeričkih i analitičkih rezultata iz Tablice 3., proračunate karakteristične vrijednosti potrebno je pomnožiti s četiri odnosno s dva za modele koji sadrže vijke postavljene naizmjenice, izuzev vrijednosti N_{Rk} .

Tablica 3. Usporedba numeričkih i analitičkih vrijednosti u kN

Naziv modela	$F_{b,Rk}$	N_{Rk}	$P_{Rk,S}$	$k_t \cdot P_{Rk,S}$	$P_{Rk,C}$	$k_t \cdot P_{Rk,C}$	F_{NUM}	F_{CALC}	$\frac{F_{CALC}}{F_{NUM}}$	$\frac{k_t \cdot F_{CALC}}{F_{NUM}}$
M1W_1	32.8	235	54.4	31.6	32.3	18.7	162	129	0.80	0.46
M1W_2	32.8	235	54.4	44.1	32.3	26.2	93	64.6	0.70	0.56
M1_1	32.8	235	54.4	31.6	32.3	18.7	143	129	0.90	0.52
M1_2	32.8	235	54.4	44.1	32.3	26.2	94	64.6	0.70	0.56
M2W_1	44.4	235	100	58	57.5	33.4	194	230	1.19	0.70
M2W_2	44.4	235	100	81	57.5	46.6	112	115	1.03	0.83
M2_1	44.4	235	100	58	57.5	33.4	166	230	1.39	0.81
M2_2	44.4	235	100	81	57.5	46.6	110	115	1.05	0.85

Dobiveni rezultati upućuju da se kod modela s manjim promjerom vijaka faktor redukcije može potpuno zanemariti ili primijeniti s modificiranim vrijednostima, dok se za veće

promjere vijaka isti mora uzeti u obzir. Općenito rezultati pokazuju da su predložene vrijednosti faktora redukcije dane u EN 1994-1-1 [6] previše konzervativne, međutim treba uzeti u obzir da je njegova primjena upitna obzirom da su materijal kao i promjer korištenih vijaka u ovom radu izvan predloženih uvjeta danih u normi. Također numerički dobiveni odnos sile i pomaka za sve modele prikazan je na Slici 3.



Slika 4. Odnos sile i pomaka

Ukoliko promatramo krivulje modela s vijcima u paru po rebru, može se uočiti da modeli s valovitim hrptom (M1W_1, M2W_1) ostvaruju veću otpornost u odnosu na modele bez valovitog hrpta (M1_1, M2_1). Takvo ponašanje modela bez valovitog hrpta proizlazi iz činjenice da zbog malog razmaka posmičnih sredstava ne može doći do razvoja pune nosivosti betona u profiliranom rebru za svaki vijak posebno, jer vrlo brzo dolazi do preklapanja područja otkazivanja betona. Međutim, za modele koji sadrže jedan vijak u rebru naizmjenice, može se zaključiti da modeli sa (M1W_2, M2W_2) i bez (M1_2, M2_2) valovitog hrpta ostvaruju jednaku otpornost sa malim razlikama u duktilnosti posmične veze. Takvo ponašanje se ostvarilo zbog postavljanja vijaka naizmjenice čime je, zbog povećanog razmaka između vijaka, omogućeno formiranje pune nosivosti betona u profiliranom limu.

4. Zaključak

U ovom je radu numerički istraženo osam *push-out* modela kako bi se dobili rezultati koji će poslužiti kao podloga za provođenje stvarnih eksperimentalnih ispitivanja. Na osnovu dobivenih rezultata mogu se dati sljedeći zaključci koje je potrebno dodatno potvrditi eksperimentalnim istraživanjem.

- Posmična otpornost modela sa valovitim hrptom ukazuje na veću krutost i veću čvrstoću kada su vijci postavljeni u paru.
- Modeli sa i bez valovitog hrpta gdje su vijci postavljeni naizmjenice pokazuju jednaku krutost i čvrstoću. Međutim, potrebno je dodatno istražiti utjecaj razmaka vijaka unutar rebara betonske ploče na ponašanje modela.
- Potrebno je dodatno eksperimentalno istražiti utjecaj promjera vijka na otkazivanje preko betona kada su rebra ploče postavljena okomito na nosač.
- Potrebno je dodatno istražiti valjanost primjene faktora redukcije k_t kada se koriste čvrstoće čelika veće od 450 N/mm² i moždanici promjera manjeg od 16 mm.

Financiranje

Ovaj rad je sufinancirala Hrvatska zaklada za znanost projektom UIP-2020-02-2964 (LWT-FLOOR).

Literatura

- [1] Wehbe N., Bahmani P., and Wehbe A., "Behavior of Concrete/Cold Formed Steel Composite Beams: Experimental Development of a Novel Structural System," *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 7, 2013, no. 1, pp. 51–59, doi: 10.1007/s40069-013-0031-6.
- [2] Bamaga S. O. *et al.*, "Feasibility of developing composite action between concrete and cold-formed steel beam," *J. Cent. South Univ.*, vol. 20, 2013, no. 12, pp. 3689–3696, Dec. doi: 10.1007/s11771-013-1897-9.
- [3] Irwan J. M., Hanizah A. H., and Azmi I., "Test of shear transfer enhancement in symmetric cold-formed steel-concrete composite beams," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 65, 2009, no. 12, pp. 2087–2098, doi: 10.1016/j.jcsr.2009.07.008.
- [4] Hsu C. T. T., Punurai S., Punurai W., and Majidi Y., "New composite beams having cold-formed steel joists and concrete slab," *Eng. Struct.*, vol. 71, 2014, pp. 187–200, doi: 10.1016/j.engstruct.2014.04.011.
- [5] Hanaor A., "Tests of composite beams with cold-formed sections," *J. Constr. Steel Res.*, vol. 54, 2000, no. 2, pp. 245–264, doi: 10.1016/S0143-974X(99)00046-2.
- [6] European Committee for Standardization CEN, EN 1994-1-1: Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, 2004.

- [7] Jakovljević I., Spremić M., and Marković Z., "Demountable composite steel-concrete floors: A state-of-the-art review," *Gradjevinar*, vol. 73, 2021, no. 3, pp. 249–263, doi: 10.14256/JCE.2932.2020.
- [8] User CAE. Abaqus 2016 (2016).
- [9] European Committee for Standardization CEN, EN 1993-1-5: Eurocode 3: Design of Steel Structures—Part 1-5: Plated Structural Elements, 2005.
- [10] Lukačević I., Ćurković I., Rajić A., and Bartolac M., "Lightweight Composite Floor System—Cold-Formed Steel and Concrete—LWT-FLOOR Project," *Buildings*, vol. 12, 2022, no. 2, doi: 10.3390/buildings12020209.
- [11] Arezoomand Langarudi P. and Ebrahimnejad M., "Numerical study of the behavior of bolted shear connectors in composite slabs with steel deck," *Structures*, vol. 26, 2020, pp. 501–515, doi: 10.1016/j.istruc.2020.04.037.
- [12] European Committee for Standardization CEN, EN 1993-1-8: Eurocode 3: Design of steel structures—Part 1-8: Design of joints, 2005.