

ZGODOVINSKI PREGLED RAZVOJA SISTEMOV PREDNAPENJANJA IN TRAJNIH PREDNAPETIH GEOTEHNIČNIH SIDER

HISTORICAL OVERVIEW OF PRESTRESSING SYSTEMS AND PERMANENT PRESTRESSED GROUND ANCHORS

dr. Iztok Klemenc, univ. dipl. inž. grad.

Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva 12, Ljubljana

Pregledni članek

UDK: 624.014.2:624.078.7.000.93

Povzetek | V članku je podan pregled razvoja sistema prednapenjanja: od prvih idej in neučinkovitih poskusov prednapenjanja do razvoja uporabnih sistemov prednapenjanja. Takšen sistem je bil pri geotehničnih sidrih prvič praktično uporabljen pri sanaciji pregrade Cheurfas v Alžiriji, po drugi svetovni vojni pa sta sledila razvoj in razširitev uporabe geotehničnih sider po celem svetu. V praksi se je vedno bolj izkazovala pomembnost trajnosti vgrajenih sider, kar je pospešilo razvoj učinkovite protikorozijske zaščite. Izkušnje iz prakse kažejo, da primerno obliko trajnih prednapetih geotehničnih sider predstavljajo sidra s celovito protikorozijsko zaščito, ki jih pri nas vgrajujemo od leta 1997, pri čemer je za zagotovitev trajnosti teh sider ključnega pomena skrbna vgradnja po (vnaprej) potrjenih izvedbenih detajlih z natančno izvedeno zaščito glav sider, katerih stanje je treba ves predvideni čas življenjske dobe sider stalno nadzorovati in vzdrževati v dobrem stanju ter preprečevati vdor (kontaminirane) vode do jeklenih delov sider.

Summary | A course of development of prestressing systems from first ideas and ineffective trials of prestressing to the development of applicable prestressing systems is presented. Such system has been for the first time used in practice at the strengthening of the Cheurfas dam in Algeria. After the World War II the development and the expanded application of ground anchors continued all over the world. The durability of installed anchors turned out increasingly important in practice, which resulted in further development of effective corrosion protection. The practical experiences indicate that the comprehensive corrosion protection can be regarded as the appropriate form of permanent prestressed ground anchors protection, whereas such anchors have been used in our practice since 1997. However, the durability of such anchors can be ensured only in the case of careful execution according to the (in advance) certified installation details with the exactly achieved anchor head protection. Moreover, the condition of corrosion protection has to be permanently inspected and maintained in good condition during all anticipated anchors service life to prevent ingress of (contaminated) water to the steel parts of anchors.

1 • UVOD

Do razvoja sistemov prednapenjanja je privedla karakteristika betona, da odlično prevzema tlačne napetosti, po drugi strani pa so njegove sposobnosti za prevzem nateznih napetosti zelo omejene. Te napetosti prevzema jeklena armatura, ki se pri tem raztegne, zaradi sprijetosti betona z armaturo pa armatura za seboj potegne tudi beton, kar privede do pojava razpok v betonu. V armiranobetonskih konstrukcijah

se pojavu razpok lahko izognemo s predhodnim prednapetjem konstrukcije, pri čemer se z uvedbo natezних sil v kabel za prednapenjanje konstrukcija tlačno obremeni že pri gradnji. Med obratovanjem zaradi delovanja obtežbe v konstrukciji nastajajo natezne sile, ki zmanjšujejo na začetku vzpostavljene tlačne napetosti, tako da v taki konstrukciji natezних napetosti običajno sploh ni.

Opisani sistem delovanja prednapetega kabla izkoriščamo tudi pri prednapetih geotehničnih sidrih, le da je v tem primeru osnovni medij, v katerega je kabel vgrajen, drugačen: prednapeta geotehnična sidra z veznim delom vpnejo v nosilna temeljna tla, medtem ko je na drugem koncu sidra preko glave sidra zagotovljen vnos sile na sidrano konstrukcijo, vezni člen med njima pa predstavlja prosti del sidra, ki služi samo za prenos natezne sile. S takimi sidri zagotavljamo, da zaledni tlaki ali pa obremenitve, ki izvirajo od drugod, sidrane konstrukcije ne odrinejo od zaledja oziroma ne premaknejo.

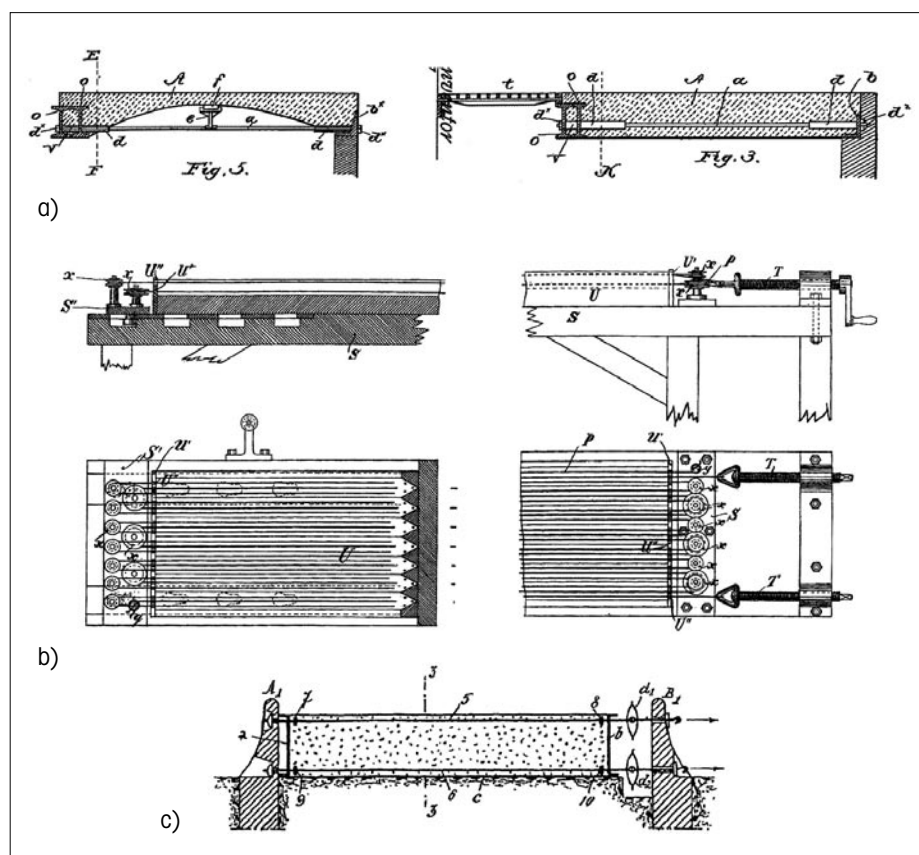
2 • RAZVOJ SISTEMOV PREDNAPENJANJA

Prvi znani primer uporabe principa prednapenjanja je pri gradnji Crystal Palace v Hyde Parku v Londonu uporabil britanski arhitekt in vrtnar sir Joseph Paxton (1803–1865). Prvotno idejo zasnove masivne zidane zgradbe je Paxton nadomestil z idejo rastlinjaka, ki so jo potem v praksi leta 1851 izvedli v obliki prefabriciranih železnih in steklenih panelov. Prvi opis ideje prednapenjanja je v patentni prijavi januarja 1886 podal Američan P. H. Jackson (Zilch, 2008). Predvidel je prednapenjanje predizdelanih ločno oblikovanih betonskih elementov z mehansko zasidraniimi železnimi vezmi, ki naj bi se bili uporabljali v pločnikih, ploščah in strehah, pri čemer so bile prednapete vezi obojestransko razvrščene v spodnjih delih betonskih elementov (slika 1a). Ne da bi vedel za patent Američana je oktobra 1888 W. Doehring iz Berlina prijavil patent, ki je predvideval minimiziranje razpok v betonskih elementih z napenjanjem žic, vstavljenih v plošče, letve in tramiče. V svojem patentu je v nasprotju z Jacksonom kot natezne elemente v betonskem prečnem prerezu namesto palic oziroma trakov uporabil žice, ki so bile zasidrane z mehanizmom sprijema z betonom. Kot je razvidno s slike (slika 1b), je bila žica preko sistema škipčevja speljana skozi namenske odprtine v opažu, tako da je nastala gosta mreža vzporedno napetih žic. Po napenjanju obeh koncev žice je bil opaž zalit z betonom, po otdritvi betona so bile vbetonirane napete žice porezane, s čimer se je prednapetje aktiviralo. Leta 1907 je praktični preskus z naknadnim vbetoniranjem vnaprej napetih jeklenih palic na visoki tehniški šoli v Stuttgartu izvedel Mathias Koenen. Poskus je bil zaradi nizkega prednapetja in prisotnih reoloških

pojavov praktično neučinkovit, je pa zato Koenen (po spletu okoliščin) pravzaprav odkril armirani beton.

Vsi dotedanji poskusi so bili opravljeni z elementi, katerih natezna trdnost je bila v

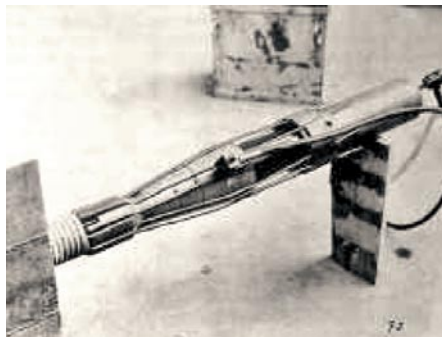
primerjavi z današnjim jeklom za prednapenjanje zelo nizka, zato jih ni bilo mogoče napeti na dovolj visoke sile, da bi lahko kompenzirale takojšnje izgube (zdrs pri zaklinjanju in elastično stisnjenje betona) kot tudi časovno odvisne izgube (relaksacija jekla, tečenje in krčenje betona). Poleg tega je zaradi časovno odvisnih deformacij betona slabe kakovosti v jeklih nizke trdnosti celotna sila prednapenja-



Slika 1 • Prvi patentirani načini prednapenjanja: a) vzdolžni in prečni prezek prednapetega predizdelanega betonskega elementa po patentu P. H. Jacksona, b) vzdolžni prezek in floris prednapetega predizdelanega betonskega elementa po patentu W. Doehringa, c) vzdolžni prezek prednapete betonske grede E. Freyssineta in J. Séaillea (Zilch, 2008)

nja hitro upadla (Gilbert, 2004). Kombinacija vseh omenjenih vplivov je pripeljala do tega, da vpliva prednapetja ni bilo mogoče ohranjati, kar je v tistem času preprečevalo uveljavljanje idej dotodanjih patentov. Češki inženir Karl Wettstein je leta 1919 sicer uspešno vbetoniral prednapete klavirske strune iz jekla visoke trdnosti, vendar uspešnosti poskusa ni znal pojasniti. Šele Američan R. E. Dill je leta 1923 ugotovil tako pomembnost izgub pri napenjanju zaradi lezenja in krčenja betona kot tudi, da je za uspešno prednapenjanje ključnega pomena uporabiti žice iz jekla visoke trdnosti, ki jih moramo napeti z dovolj visokimi silami (Zilch, 2008).

Pionir današnjega prednapetega betona je francoski inženir Eugène Freyssinet, ki sistema prednapenjanja kot takega sicer ni odkril, je pa hitro prepoznal njegov velik pomen in je ključno prispeval k njegovemu razvoju. Intenzivno se je posvetil tej tehniki – preko preiskav lezenja in krčenja betona kot tudi uporabe močno prednapetih žic iz visokovrednega jekla je postavil potrebne pogoje za uspešno izvedbo prednapenjanja betona. Na primeru gradnje mostu Plougastel Bridge preko treh polj z razpetinami po 180 m je detajlno preučil tečenje in razvil svojo idejo prednapenjanja, za katero sta s sodelavcem J. Séaillesom novembra 1928 pridobila patent (Zilch, 2008); postavljena je bila ideja prednapenjanja, po kateri se material (v tem primeru armirani beton) izpostavi tlačnim napetostim, ki so posledica delovanja jeklenih kablov, vgrajenih v konstrukcijo, med obratovanjem konstrukcije pa se vanjo vnašajo natezne napetosti. V patentu sta predvidela prednapenjanje betonskih konstrukcijskih elementov z okroglimi jeklenimi elementi visoke trdnosti, prednapetimi vsaj na 400 MPa (slika 1c). Z uporabo visokovrednih materialov in dovolj visokim prednapetjem jima je uspel kvalitativni preskok, s čimer je princip prednapetega betona postal praktično uporaben. Freyssinet je v obdobju med letoma 1928 in 1936 patentiral različne izume v zvezi z napenjalkami za prednapenjanje kablov iz jekla visoke trdnosti (slika 2) in razvil tehnologijo zasidranja nateznih elementov, ki je omogočila zadostno fleksibilnost sistema za uporabo na različnih tipih konstrukcij, vključno s prednapetimi geotehničnimi sidri.



Slika 2 • Hidravlična napenjalka, kot jo je razvil Eugène Freyssinet (Giovannardi, 2009)

Freyssinet je svoj sistem prednapenjanja v praksi prvič uporabil pri sanaciji terminala prekooceanke Normandie v pristanišču Le Havre (slika 3) leta 1933 (Giovannardi, 2009). Ogromen kompleks dolžine skoraj 600 m in širine 45 m je bil v resni nevarnosti, da se zaradi hitro napredujočega posedanja poruši, še preden bo dokončan. Obrežni zid je trdno stal na podlagi, medtem ko je pristaniška zgradba izrivala plast mulja in se ob tem intenzivno posedala. Ključno vlogo v izbranem sistemu sanacije so imeli trije glavni betonski nosilci, vstavljeni pod zgradbo, s katerimi je medsebojno prednapel glave obstoječih kolov, v nadaljevanju pa je skozi luknje v teh nosilcih navzdol spustil cevaste betonske kole, ki jih je nato zalil in prednapel v dolžini 2 m. Takoj, ko so prvi koli dosegli globlji sloj gramoza, se je posedanje

upočasnilo. Na koncu je zgradbo z napenjalkami s prednapetimi betonskimi nosilci ponovno dvignil na predvideno raven.

Ta uspešno zaključeni projekt je predstavljal prelomnico v življenju Freyssineta, s katero pa se je tudi začela uporaba sistema prednapenjanja, katere dodatni zagon sta predstavljala njegova patenta stožčastih sidrnih kablov leta 1939 in sistema ponapenjanja leta 1940. Leta 1943 je dokončal gradnjo prvega prednapetega mostu preko reke Longroy Bresle, kar je odprlo pot gradnji številnih prednapetih mostov v povojnem obdobju obnove v Franciji kot tudi po svetu (Giovannardi, 2009), (Fuzier, 2007). Pomembnejši patenti s področja prednapenjanja (Dischinger leta 1934, Hoyer leta 1937, Mantscheff leta 1962 ter Leonhardt leta 1964) in nadaljnji razvoj sistemov prednapenjanja so pomembno vplivali predvsem na gradnjo mostov in stavb, vendar pa niso imeli več takega vpliva na tehnološki razvoj sistema prednapenjanja v sklopu zasnove in izvedbe prednapetih geotehničnih sider (Zilch, 2008). V petdesetih in šestdesetih letih 20. stoletja je bilo predvsem v Evropi razvitih in v uporabi preko sto različnih sistemov prednapenjanja. Kasnejši gospodarski razvoj je med temi sistemi povzročil precejšnjo selekcijo, tako da danes med pomembne štejemo manj kot deset sistemov (Hunkeler, 2005). Po istem viru je bila med zadnjimi pomembnimi koraki pri razvoju sistemov prednapenjanja uvedba pletenih pramen, katerih uporaba se je od leta 1960 naprej stalno povečevala.



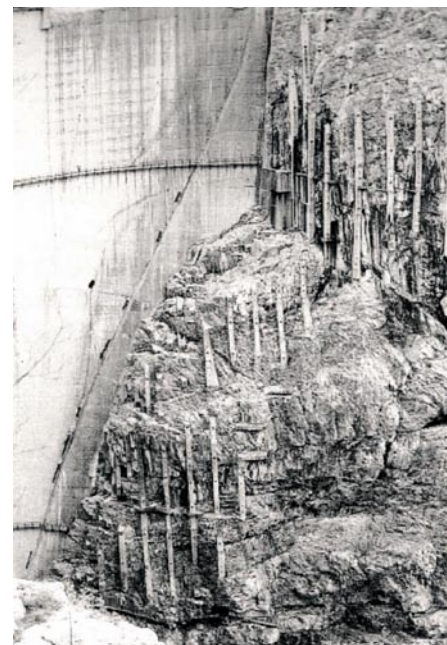
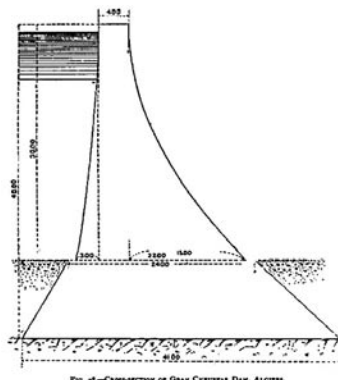
Slika 3 • Kompleks pristanišča Le Havre (levo); izvedba prednapetega betonskega nosilca, ki ga je Eugène Freyssinet predvidel v sklopu sanacije (desno) (Giovannardi, 2009)

3 • POJAV IN ZAČETKI RAZVOJA GEOTEHNIČNIH SIDER

V naravi lahko najdemo različne sisteme sidranja, kot so na primer koreninski sistemi

dreves in različnih trav. Možno je, da so pravi v teh sistemih stare civilizacije našle ideje za

izvedbo sidranja svojih zgradb. Dober primer tradicionalne gradnje je Aqar Quf, eden od številnih stopničastih stolpov Babiloncev v južni Mezopotamiji, ki jih lahko še najdemo 30 km vzhodno od današnjega Bagdada (Irak) in ki so bili zgrajeni iz ilovnatih opek,



Slika 4 • Pogled na pregrado Cheurfas v Alžiriji, zgrajeno leta 1882 (Barrage – Cheurfas, 2009) (levo), prečni prerez skozi masivno pregrado (Wilson, 2008) (desno)

Slika 5 • Sidranje podpore pregrade zajezitve Vajont v Italiji (Wichter, 2000)

medsebojno povezanih s plastmi trsja. Njihov koncept prevzemanja nateznih obremenitev je do neke mere podoben ideji moderne armirane zemljine, ki smo jo začeli uporabljati kakih 3500 let kasneje.

Prvi pojavi začetkov sidranja so v dostopnih zgodovinskih virih dokumentirani konec 19. stoletja. Frazer (1874) je opisal preskuse na sidrih iz kovanega železa, vgrajenih za podpiranje brežine prekopa vzdolž železniške povezave London–Birmingham. Anderson je leta 1900 dokumentiral uporabo uvrtnih kolov v vlogi nateznih sider za preprečitev dviga talnih plošč pri poplavih (Xanthakos, 1991). Nekako v istem času so v zgornješlezjskih premogovnikih za varovanje področja temena pri rudarskih izkopih in vnosih nateznih sil v tla že uporabljali kratka sidra v obliki jeklenih palic. V prvih desetletjih 20. stoletja so bili primeri uporabe sider v gradbeništvu omejeni na posamezne primere podpiranj podzemnih prostorov v kamninah (Wichter, 2000).

Francoski inženir Andre Coyne je vodil izvedbo del na prelomnem primeru ene od prvih in zelo impresivnih uporab sidranja s prednapetimi geotehničnimi sidri pri ojačitvi masivne pregrade Cheurfas v Alžiriji (Barrage des Cheurfas), izgrajene leta 1882 z namenom zadrževanja vode za namakanje. Kot je razvidno s slike 4, gre za tiste čase res impozanten objekt, saj skupna višina pregrade znaša 30 m, dolžina 155 m in širina krone na vrhu 4 m, medtem ko je širina pregrade ob temelju 22 m. Masivna pregrada je bila zgrajena v dveh delih: v spodnjem delu je trapezno oblikovani temelj iz grušča, na katerem je zgrajena sama pregrada, katere gorvodna in dolvodna površina sta parabolične oblike. Pregrada zadržuje vodo globine 40 m, največji tlak na telo pregrade v notranjosti pa je 0,65 MPa (Wilson, 2008).

Težnostna pregrada, zgrajena iz tradicionalnih (masivnih) materialov, je bila v poplavih leta 1885 delno porušena in nato obnovljena leta 1892. V zgodnjih tridesetih letih 20. stoletja so bili ugotovljeni znaki nestabilnosti temeljev. V obdobju 1934–1935 je bila v sklopu sanacije pregrade v rastru 3,5 m vgrajena vrsta navpičnih geotehničnih sider nosilnosti 10 MN, ki so v veznem delu sider segala približno 15 m globoko v peščenjak pod temelj pregrade. Vgrajena sidra so bila naknadno prednapeta s hidravličnimi napetjalkami. V smislu zasnove glave sider so bile pri pregradi Cheurfas oblikovane kot 50 kN betonski bloki, medtem ko so pri pregradi Bou-Hanifia že uporabili 15 kN jeklene glave sider. Po drugi svetovni vojni so bile glave sider sestavljene samo še iz klinastih elementov relativno majhnih premerov, ki so se opirali na sidrne plošče.

Izvedena sanacija s prednapetimi sidri se je izkazala kot ključna prelomnica za razvoj in uporabo prednapetih geotehničnih sider, saj sta se od takrat naprej tehnologija in praksa sidranja razvijali v interdisciplinarno tehniko, ki se danes uporablja praktično v vseh delih sveta. Razvoj sider se je v obdobju med letoma 1934 in 1940 začel v Franciji s konstrukcijami družb Rodio in Sondages, Etanchement, Consolidation (današnji Soletanche Bachy). Za premagovanje težav pri zasidranju nateznega elementa v območju glave sidra in v območju zainjektiranja veznega dela sidra sta omenjeni družbi prenesli in uporabili ideje, ki sta jih razvila francoska inženirja Coyne in Freyssinet. Sidra so vgrajevali tako, da so bili njihovi vezni deli nameščeni bodisi v hribini bodisi v masivni beton pregrade, pri čemer so v poskusih uspeli doseči sidrne sile do 12 MN, kar so bile za tiste čase izredno visoke sidrne sile, ki so zahtevale povečane dimenzije sidrane konstrukcije za njihov prevzem (Wichter, 2000).

Po drugi svetovni vojni je z začetkom proizvodnje jeklenih žic in pramen visokih trdnosti kot tudi razvojem metod vrtnanja in injektiranja v številnih evropskih državah (Francija, Nemčija, Švedska in Švica, kasneje pa tudi v Veliki Britaniji) prišlo do razvoja prednapetih geotehničnih sider (Xanthakos, 1991). Področja in način njihove uporabe so se začela širiti: pri izvedbi sidranja v sklopu pregradnih zidov Castillon v Franciji (1948) in Vajont v Italiji (1960) (slika 5) so v območju bočnih opor zidov s prednapetimi geotehničnimi sidri ojačali skalno brežino, sidra pa so uporabili tudi pri gradnji kavern elektrarn v Švici – Maggawerke, 1954, Grand-Dixence in kaverna Nendaz, 1957 (Wichter, 2000). Isti vir tudi navaja, da so se prednapeta geotehnična sidra v gradbeništvu v večjem obsegu začela uporabljati po letu 1958, ko je bilo uspešno vgrajeno prvo sidro v zemljini. Zadnji veliki tehnološki korak naprej pri prednapetih geotehničnih sidrih je bil opravljen z uveljavitvijo ideje o skrajšanju veznih delov posameznih enot kabla sidra in njihovo zamaknjeno porazdelitvijo vzdolž veznega dela sidra. Prve ideje o zamikanju veznih delov sider so se morda pojavile že prej, vendar je bil Tony Barley tisti, ki je leta 1978 opravil izvelične preskuse zelo kratkih veznih delov pramen s končnimi objemkami, zalitimi v smoli. Preskusi so pokazali, da se je kljub kratkim veznim delom pramenska sila v celoti prenesla na smolo, pri čemer lahko preskus treh takih, medsebojno zamaknjenih enot,

vgrajenih v dvometrsko jekleno cev, smatramo kot prvi preskus večkratnega sidra (angl. single bore multiple anchor). Z raziskavami uporabe kratkih dolžin pramen za prenos sile na injekcijsko maso v kratkih zaščitnih ovojih je Barley nadaljeval v začetku osemdesetih. Prva komercialna uporaba pravih večkratnih sider je bila izvedena leta 1988 v Southamptonu (Barley, 1997): vsaka enota (podsidro) je imela svoj zaščitni ovoj in je bila v veznem delu sidra ločena od drugih enot, posebne čeljusti pa so v veznih delih enot sidra za-

gotavljale popoln prenos sidrskih sil. Čeprav so bila sidra napeta s skupno napenjalno, ki ne omogoča različnih izvlečkov posameznih enot sidra, zaradi česar so bile vnesene sile zaradi različnih dolžin prostega dela proti konici sidra vedno manjše, je bila nosilnost teh sider za približno 50 % večja v primerjavi s sidri klasične izvedbe.

Po Barleyu so med preskusom sider, sestavljenih iz petih podsider, vgrajenih v glinasta tla v Bracklesham Bedsu, z obročnim dinamometrom izmerili skupno silo 1337 kN.

V nadaljnjem osemletnem obdobju sta se razvoj in tehnološko izpopolnjevanje večkratnih sider še nadaljevala, pri čemer je bilo do leta 1997 vgrajenih že 25.000 večkratnih sider. Z večkratnimi sidri je bila premagana tehnološka omejitev dolžine veznih delov klasičnih sider nekje na 8 do 10 m, saj so lahko vezni deli večkratnih sider bistveno daljši – dolžine veznih delov večkratnih sider lahko dosežejo celo do 30 m, pri čemer je možno v glinah doseči porušne sile med 2000 in 3000 kN (Barley, 1995).

4 • RAZVOJ SISTEMA PROTIKOROZIJSKE ZAŠČITE TRAJNIH PREDNAPETIH GEOTEHNIČNIH SIDER

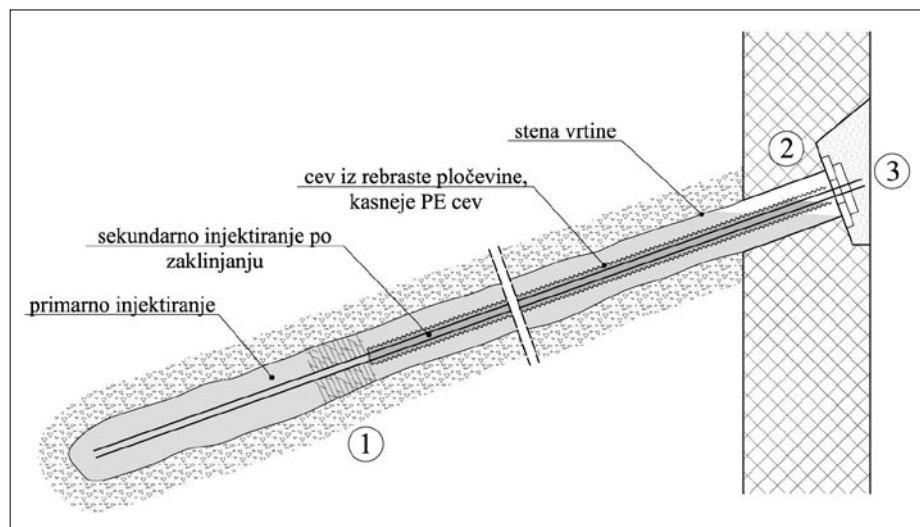
Z razvojem in začetkom uporabe prednapetih geotehničnih sider se je kmalu začelo postavljati vprašanje, koliko časa bodo vgrajena in zaklinjena sidra sposobna zagotavljati prenos nateznih sil, kar se neposredno navezuje na problematiko protikorozijske zaščite sider. Nosilci razvoja oblikovanja zaščite prednapetih sider pred propadanjem zaradi delovanja korozivnih procesov v svetovnem merilu so delovali v Evropi, pri čemer je bil z uvedbo tehnološke rešitve v obliki celovite protikorozijske zaščite jeklenih delov prednapetih sider preboj v svetovnem merilu narejen v Švici.

Na osnovi tehnologije sistemov prednapenjanja konstrukcij so bila v sredini prejšnjega stoletja vgrajena prva prednapeta **sidra s polno povezavo**, pri katerih je bila na prosti del sidra dodatno pritrjena cev iz rebraste pločevine, ki je omogočala stopenjsko za-injektiranje jeklenih žic s cementno injekcijsko maso: po vstavitvi sidra v vrtno so sprva zalili vezni del sidra, po doseženi trdnosti injekcijske mase so sidro napeli in zaklinili, nakar so zalili še žice v prostem delu, tako da v uporabnem stanju takšno sidro nima več nobenega prosto raztegljivega dela. Povsem na koncu so praviloma obbetonirali še glavo sidra. Taka sidra so po dostopnih podatkih vgrajevali približno do leta 1975.

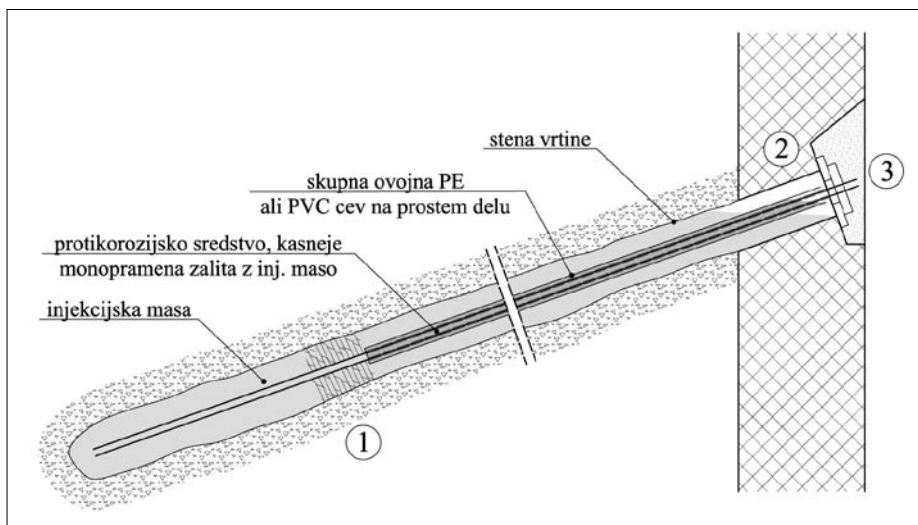
Za sidra s polno povezavo je značilno, da edino protikorozijsko zaščito jeklenih žic predstavlja plast injekcijske mase vzdolž celotne dolžine jeklenih žic. Ob skrbni vgradnji in v neagresivnem okolju injekcijska masa v prostem delu sidra ter v območju glave sidra lahko zagotavlja relativno dolgoročno zaščito, vendar je pregledovanje stanja takih sider zaradi nedostopnosti zelo omejeno izključno

na vizualni pregled področja vbetoniranih glav sider. Šibka mesta sider s polno povezavo (slika 6) so začetek veznega dela sidra (območje ① z razpokano cementno injekcijsko maso), področje pod glavo sidra (preostala votla mesta ② po končanem primarnem in sekundarnem injektiranju) kot tudi porozen, razpokan ali slabo oprijet prekrivni beton ③ za obbetoniranje glav sider. Če se v življenjski dobi sidra poveča sidrna sila, so sidra vzdolž prostega dela zaradi nastalih razpok v injekcijski masi korozivno močno ogrožena. Krhke porušitve zaradi napetostne korozije so se zgodile le v izjemnih primerih, pri čemer je o poškodbah tega tipa sider v literaturi zelo malo podatkov, saj porušitev sidra praktično ni opazna, vse dokler ni poškodb oziroma porušitve sidranega objekta (Hunkeler, 2005).

V sredini šestdesetih je bila dosežena prva stopnja razvoja samostojne tehnike protikorozijske zaščite, ko so se pojavila **sidra z gibljivim prostim delom**, katerih tipična značilnost je bila možnost raztegovanja jeklenega kabla v prostem delu med življenjsko dobo sidranja. Ključna izboljšava v razvoju je bila uvedba monoprarnen (zaščita vsakega pramena posebej z namastitvijo in oplasčenjem v polietilensko, PE, ovojno cev), vendar pa je na veznem delu edino protikorozijsko zaščito še vedno predstavljala le strjena injekcijska masa. Čeprav se protikorozijska zaščita takih sider še vedno šteje kot nezadostna, so se z uvedbo monoprarnen poškodbe na prostem delu sider pojavile le še posamično. Šibke točke (slika 7) so začetek veznega dela sidra, kjer še ni bilo zaščitne plastične cevi (razpokana cementna injekcijska masa ①), nezatesnjen stik in področje pod glavo sidra ② (nepopolna zapolnitev pod sidrno ploščo oziroma otekanje plastičnega polnilnega sredstva) ter pomanjkljiva zaščita glave sidra ③ (brez



Slika 6 • Prednapeto geotehnično sidro s polno povezavo z označenimi šibkimi mesti (Hunkeler, 2005)



Slika 7 • Prednapeto geotehnično sidro z gibljivim prostim delom z označenimi šibkimi mesti (Hunkeler, 2005)

pokrova sidra, porozen, razpokan ali slabo oprijet prekrivni beton pri obbetoniranih glavah sider) (Hunkeler, 2005). Sidra z gibljivim prostim delom so od leta 1977 naprej v celoti izpodrinila sidra s polno povezavo, v istem letu se je v Švici pojavil tudi prvi standard SIA (1977) za geotehnična sidra.

Z uvedbo tega tipa sider se je razvoj prednapetih geotehničnih sider ločil od sistemov prednapenjanja drugih konstrukcij: v prednapetem betonu je v času zaklinjenja sila največja, nato pa med življenjsko dobo upada proti neki končni vrednosti, pri čemer se razdalja med obema skrajnima mestoma zaklinjenja skrajša za manj kot 0,5%; na drugi strani se lahko sila v nateznem kablu sidra med življenjsko dobo znatno spremeni (poveča ali zmanjša) tudi za 20 do 50 %, pri čemer se lahko razdalja med obema skrajnima točkama vnosa sile v obeh smereh spremeni za 1 do 10 % (Hunkeler, 2005). Zaradi tega se med življenjsko dobo sidranja posledično pojavlja potreba po prilagajanju sidrskih sil.

Pri prvih sidrih z gibljivim prostim delom je na prednapetem jeklu prihajalo do krhkih porušitev zaradi napetostne korozije, vzbujene z vodikovo krhkostjo, ki se je praviloma razvila na mestih lokalnih korozijskih izjed, običajno v globini do 1,5 m pod glavo sidra, v več primerih pa tudi na preostalem prostem delu sidra, še posebno na stiku prostega in veznega dela sider. Redkeje je zaradi enakomerne površinske korozije prihajalo do porušitev pod glavo sidra ali na stiku prostega dela z veznim. Razširjenost korozijskih poškodb je bila precej različna: pri nekaterih

objektih kljub sistematičnim pregledom niso bile odkrite nobene poškodbe, pri drugih so bile ugotovljene posamezne porušitve žic pramen praktično nepomembne za varnost objekta, nasprotno pa je pri drugih objektih prišlo do skoraj sistematičnih porušitev. Podobno velja tudi za bolj ali manj enakomerne korozijske poškodbe na elementih glav sider in zaščitnih pokrovi. Prehod s sider s polno vezavo na prva sidra z gibljivim prostim delom brez dvojne protikorozijske zaščite je bil s stališča trajnosti in tveganja pojava porušitve pravzaprav korak nazaj pri razvoju sider (Hunkeler, 2005).

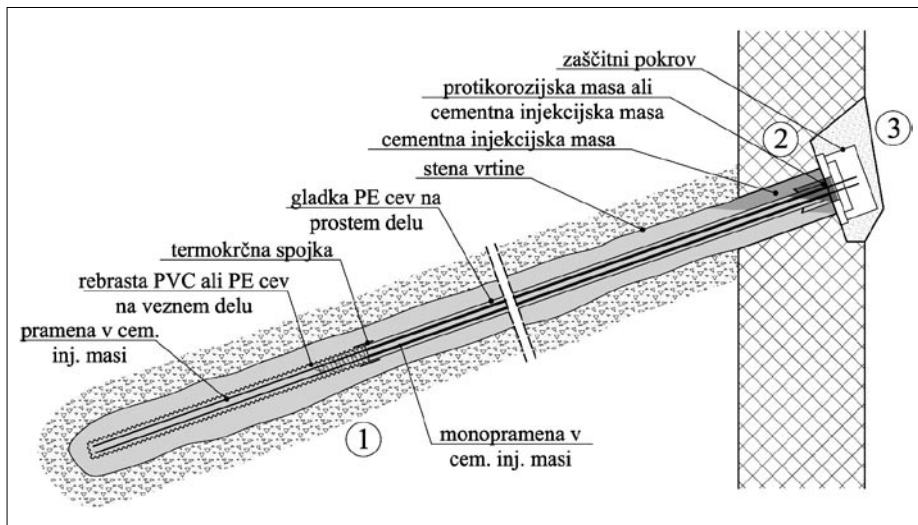
Glavni vzrok korozijskih poškodb na prednapetem jeklu sider z gibljivim prostim delom so bili nedodelani tehnološki detajli. Problem predstavlja netesen stik med glavo sidra in zaščitnim ovojem, saj je bilo pri poševnih sidrih polnjenje zgornjega dela tega prostora z injekcijsko maso vedno nepopolno, poleg tega pa plastično protikorozijsko sredstvo ni v celoti prekrilo površine posameznih pramen prostega dela sider (bodisi so bile v sredstvu praznine bodisi je to sredstvo oteklo s površine pramen); pogosto je bila za sidranim objektom odkrita še (kontaminirana) pronikajoča voda, ki je imela tako prosto pot do jeklenih pramen. Protikorozijska zaščita, izvedena na prostem delu sider v šestdesetih, je bila nezadostna, saj so žice premazali le z bitumnom ali sintetičnimi smolami, palice (izdelane iz jekel, še posebno občutljivih na pojav napetostne korozije) pa so ovili le z izolacijskim trakom, uporabljena sredstva pa tudi niso v zadostni meri ščitila prednapetega jekla pred korozijo. Dodatna vzroka za koro-

zijske poškodbe prednapetega jekla sider sta še (Hunkeler, 2005):

- nepopolno primarno zainjektiranje zgornjega območja veznega dela sider, ki je bilo posledica neizvršene ali nezadostne konsolidacije vrtine oziroma poteka veznega dela sidra skozi različna tipa tal zaledja, zaradi česar je pet let po izvedenem sidranju prišlo do edine v literaturi objavljene porušitve sidranega objekta (viseči most preko reke Thur za cevovod tovarne v Dietfurtu, St. Gallen, Švica);
- predhodna poškodba prednapetih palic zaradi nepravilnega skladiščenja (skladiščenje nezaščitenih palic na prostem, deloma celo v bližini cest, pozimi posipanih s soljo) in na katerih so bile že v času vgradnje prisotne lokalne korozijske poškodbe, na mestu katerih je v kratkem času prišlo do krhke porušitve zaradi napetostne korozije.

Po dostopnih podatkih so bila prva sidra v Švici z rebrasto plastično cevjo opremljena leta 1974, bolj sistematično pa so se rebraste cevi začele uporabljati od leta 1978 naprej. Na prehodu veznega dela v prosti del so rebrasto in gladko plastično cev stikovali s kosom termokrčne cevi. V začetku osemdesetih so se začela pojavljati tudi sidra, pri katerih sta bila poleg zaščite jeklenega kabla v veznem delu sidra s PVC-rebrasto cevjo izvedena tudi stikovanje in tesnjenje območja prehoda glave sidra v gladko zaščitno cev prostega dela sidra, kar je omogočalo sprva notranje injektiranje, kasneje (od leta 1983) pa tudi zunanje injektiranje tega območja pod glavo sidra. Taka sidra so poimenovali **sidra z dvojno protikorozijsko zaščito** (slika 8), pri katerih se je z uporabo rebrastih plastičnih cevi zaščita pramen v območju vnosa sile zelo izboljšala, v območju pod glavo sidra je bil zatesnjen prehod s cevi prostega dela na elemente glave sidra, v tem delu je bilo izvedeno zunanje in notranje injektiranje, sistematično pa so se začeli vgrajevati zaščitni pokrovi.

Teoretično vodotesen spoj plastičnih cevi na stiku prostega in veznega dela pri pramen-skih sidrih se je v praksi pogosto izkazal kot ranljiv ① (pojav poškodb pri transportu, vgradnji ali napenjanju sider), zatesnitev na prehodu z zaščitne cevi na glavo sidra pogosto ni vodotesna ② (bodisi zunanji del ni bil v celoti zainjektiran bodisi je plastična protikorozijska masa otekla), prekrivni beton pri obbetoniranih glavah sider ③ je porozen, razpokan oziroma slabo oprijet. Med glavo sidra in sidrano konstrukcijo ni električne izo-



Slika 8 • Prednapeto geotehnično sidro z dvojno protikorozijsko zaščito z označenimi šibkimi mesti (Hunkeler, 2005)

lacije, zato se lahko pojavijo poškodbe zaradi blodečih tokov (Hunkeler, 2005).

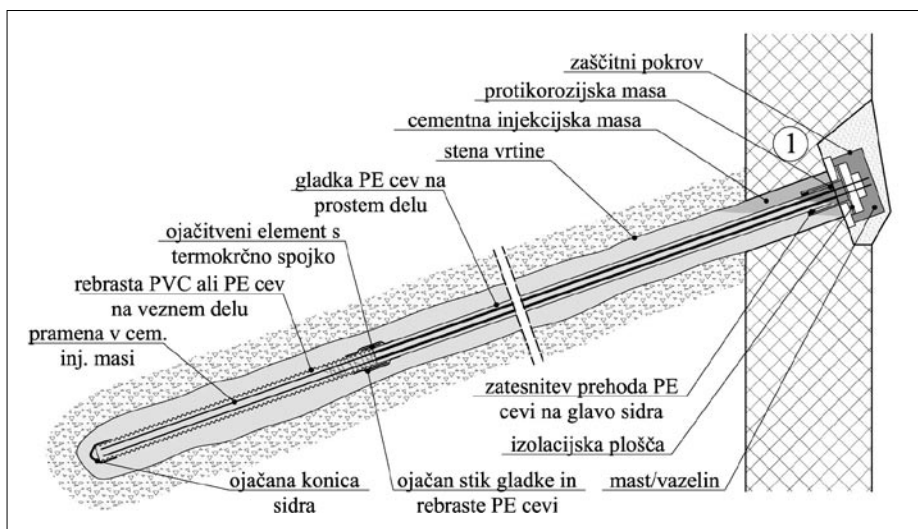
Sidra z dvojno protikorozijsko zaščito, ki so se v Švici pojavljala od leta 1983 do 1994, v splošnem veljajo kot zadostno protikorozijsko zaščitena, problematična so le na stiku gladke in rebraste zaščitne cevi, pri pojavu zaledne vode pod pritiskom ter v primeru izpostavljenosti močnim blodečim tokovom. Pri ustrezno projektiranih konstrukcijah so se pri tem tipu sider korozijske poškodbe pojavile le še posamično. V literaturi je naveden le en primer, pri katerem so bila v sidrani objekt vgrajena sidra z dvojno protikorozijsko zaščito, vendar domnevajo, da je bil zaradi dolgega

časa gradnje (od 1979 do 1983) le del sider izveden s tako protikorozijsko zaščito, pa še v tem primeru brez injektiranja območja neposredno pod glavo sidra (Hunkeler, 2005). Pri pregledu dela od 193 vgrajenih sider so bili ugotovljeni dva pretrga žice v pramenih in en pretrg pramena, do katerih je prišlo zaradi krhkega loma, ki je bil posledica pojava nape-
tostne korozije na mestih lokalnih korozijskih izjed.

Leta 1985 so v Švici opravili obsežnejše sidranje podpornega zidu, izvedenega v sklopu elektrificirane železnice na železniški postaji Stadelhofen v Zürichu, kjer so bili prisotni za prednapeta geotehnična sidra potencialno

zelo nevarni blodeči tokovi. Z nadgradnjo sider z dvojno protikorozijsko zaščito so oblikovali **sidra s celovito protikorozijsko zaščito** (slika 9), ki so bila v začetku še precej nezanesljiva, vendar so z izboljšavami detajlov in skrbnim ravnanjem s sidri dosegli, da so z meritvami električne upornosti, izvedenih v sklopu kontrole tesnosti zaščitnega ovoja, dokazali, da je 90 % sider po preskusu napenjanja izkazovalo zadostno električno upornost ($\geq 0,1 \text{ M}\Omega$). Za možnost dolgoročne kontrole zaklinjenih sider je bilo treba izvesti še električno izoliran kontakt na stiku proste dolžine in glave sidra kot tudi med glavo sidra in sidrano konstrukcijo. Prvo uspešno električno izolacijo glave sidra so opravili pri sidranju severnega portala predora Seelisbergtunnels leta 1992. Na podlagi teh izkušenj so bile postavljene zahteve za sistematično preverjanje sider s celovito protikorozijsko zaščito z meritvami izolacijske upornosti. S tem so bile odpravljene vse slabosti prejšnjih sistemov sidranja, hkrati pa je z električno izolacijo sidra od tal in sidrane konstrukcije preprečeno ogrožanje sider zaradi delovanja blodečih tokov in nastanka makroelementa med jeklom sidra in armaturo objekta. Pri sidrih z zadostno upornostjo ni pričakovati bistvenih korozijskih poškodb, vendar pa so pri tem tipu sidra vseeno mogoče predhodne poškodbe pramen zaradi nepravilnega skladiščenja sider na gradbišču, zaradi nepravilnosti pri vgradnji sider pa lahko pride do poškodb plastičnega zaščitnega ovoja sider.

Kritično mesto ostaja območje glave sidra ①, ki se izvede na mestu vgradnje sidra: v času od zainjektiranja sidra v vrtnico pa vse do izvedbe končne protikorozijske zaščite obstaja nevarnost vdora padavin ali površinske vode v notranjost monopramen ali v območje prijema zagozd, česar pa z meritvami električne upornosti ni mogoče zaznati. Poleg tega lahko pri izvedbi protikorozijske zaščite pride do nedoslednosti v obliki odstopanj od potrjenih izvedbenih detajlov oziroma uporabe nepotrjenih sestavnih komponent sider. Z doslednim upoštevanjem določil podeljnih tehničnih soglasij in poostrenim nadzorom skladiščenja, vgrajevanja in še posebno izvajanja vseh ukrepov protikorozijske zaščite se je zgoraj navedenim nevarnostim možno izogniti, vendar pa naša praksa žal kaže, da zaradi nedoslednosti in napak pri izvedbi protikorozijske zaščite glav sider tudi pri tem dobro zasnovanem konceptu zaščite še vedno prihaja do netesnih izvedb zaščite in korozijskih poškodb jeklenih nosilnih delov sider (Klemenc, 2008b).



Slika 9 • Prednapeto geotehnično sidro s celovito protikorozijsko zaščito z označenim potencialnim šibkim mestom (Hunkeler, 2005)

5 • KRATEK PREGLED UVELJAVLJANJA GEOTEHNIČNIH SIDER PO SVETU

5.1 Praksa sidranja v Švici

Prva sidra s polno povezavo v kamnini so bila v Švici vgrajena v podzemni kaverni črpalne hidroelektrarne Maggia v letu 1951, leta 1962 so vgradili še prvo sidro takega tipa tudi v zemljini (Hunkeler, 2005). V Švici so se ta sidra v obliki natezних kablov, sestavljenih iz žic (nem. Drahtanker), v petdesetih in šestdesetih letih 20. stoletja uporabljala pri gradnji hidroelektrarn in pri gradnji državnih cest, pri čemer je del priznanih švicarskih izvajalcev sidranja v začetku sedemdesetih kable iz žic nadomestili s prameni, medtem ko so nekateri izvajalci s kabli iz žic vztrajali do sredine osemdesetih. V začetku so v Švici pramenska sidra, analogno sidrom s kabli iz žic, v območju glave sider zasidrili s skupno kotvo in eno centralno (skupno) zagozdo oziroma so pramena posamično zaklinili v izbočeno (obokano) kotvo, vendar pa so se hitro uveljavile ravne skupne kotve, v katerih se vsa pramena sicer zaklinijo hkrati, pri čemer se vsak pramen zaklini s svojo zagozdo.

Koncem šestdesetih je izvajalec VSL razvil svoj tip sidra, pri čemer kot prvi ni razlikoval med zemljinjskimi in kamninskimi sidri, ampak je uvedel razlikovanje med začasnimi in trajnimi sidri, kar je imelo specifične posledice v zvezi z oblikovanjem protikorozijske zaščite sider. Sidra so uporabljali za sidranje kamnin, v katerih so bile prisotne diskontinuitete, pri čemer so v vsakem profilu uporabili po eno sidro, s čimer je bilo podpiranje diskontinuirano, kar je omogočilo prosto raztezanje vsakega sidra brez povzročanja sekundarnih napetosti v sosednjih profilih. Princip samopodpiranja podzemnega objekta s prednapetimi kamninskimi sidri je bil prvič uporabljen leta 1970 na podzemni kaverni črpalno-shranjevalne postaje Hongrin ob Ženevskem jezeru, pri čemer lahko to uporabo štejemo kot predhodnico Nove avstrijske metode, vpeljane koncem sedemdesetih (Xanthakos, 1991).

5.2 Praksa sidranja v Franciji

Razvoj podpornih sistemov tal v Franciji je potekal vzporedno s potrebo po podzemnih prostorih in globokih izkopih v izgrajenem urbanem okolju, kjer se v ta namen od leta 1953 naprej uporabljajo tudi geotehnična sidra z ločenim prostim delom in veznim delom. Tipičen primer uporabe sidranja v pozidanem mestnem okolju je bil koncem sedemdesetih primer izgradnje postaje podzemne železnice

v okviru projekta Halles Forum v Parizu, kjer je bil izkop varovan z začasnimi prednapetimi sidri s predvideno življenjsko dobo štiri do pet let (Xanthakos, 1991).

5.3 Praksa sidranja v Nemčiji

V Evropi se je razvoj prednapetih sider v zemljinah leta 1958 začel s tehnološkim neuspehom. Do takrat so namreč stene gradbenih jam vedno varovali s podporniki. Gradbena jama za novo radijsko postajo v Münchnu naj bi bila kot prva v Nemčiji izvedena kot pilotna stena brez opornikov, ki so jo opirali s sidri, sidranimi v sidrne vodnjake, ležeče 10 m za pilotno steno (Wichter, 2000). Izkazalo se je, da je bilo s takrat razpoložljivo vrtno opremo vodnjake težko zadeti, saj so s številnimi vrtnami zgrešili jaške. Pri izvlačenju drogovja iz proda so morali premagovati trenje, ki je bilo istega velikostnega reda, kot so bile potrebne sidrne sile, zato so naredili poskus, da bi to trenje s cementno suspenzijo še povečali in izrabili. V ta namen so uporabili žrtvene vrtnalne krone z uvrtnim navojem. Po doseženi želeni globini so skozi drogove v vrtnalne krone privijačili natezne palice, nato pa so hkrati z izvlačenjem drogovja s cementno suspenzijo pod povišanim tlakom zainjektirali spodnjih 5 m vrtnice. Po nekaj dneh so sidra poskusno obremenili in ugotovili, da se sidra lahko obremenijo s silo na meji tečenja jekla. Ker se je v praksi izkazovalo, da je izvedba sidranja pri globokih gradbenih jamah cenejša od opiranja sten jame, se je razvoj sidranja gradbenih jam nadaljeval. Že leta 1958 je bil razvit sistem Bauer, pri katerem se v vrtno majhnega premera (\varnothing 8 cm do \varnothing 14 cm), izvrtano v tla, vgradi palico iz jekla višjih natezних trdnosti, vmesni prostor pa je zalit s primerno cementno maso. Od sredine do konca šestdesetih so bili v Nemčiji prisotni že trije izvajalci, ki so začeli sistematično sidrati gradbene jame (Dausch, 2001). Obseg izvedenega sidranja je hitro naraščal, saj je samo Bauer do leta 1965 vgradil že približno 30.000 sider (Xanthakos, 1991).

5.4 Praksa sidranja v Veliki Britaniji

Na britansko tehnologijo sidranja v šestdesetih je vplival razvoj sidrnih sistemov v Nemčiji (konec tlačnega injektiranja skozi obložne cevi) in Franciji (poinjektiranje), medtem ko je imela Velika Britanija vodilno vlogo pri razvoju vrtnic z več stožčastimi razširitvami (angl. multi

underreaming). V Veliki Britaniji so geotehnična sidra sprva vgrajevali kot podporne elemente za preskušanje pilotov in za stabilizacijo povoznih površin v premogovnikih (Xanthakos, 1991). Leta 1961 so v Durbanu (Škotska) v glino izvrtali prve vrtnice manjših premerov z več stožčastimi razširitvami v veznem delu sider, kamor so vgradili prednapeta sidra. Do konca šestdesetih je bila izvedba vrtnic z več stožčastimi razširitvami v trdnih glinah že povsem uveljavljena (Weatherby, 1982). Leta 1966 so v sklopu izkopa zidu v Bristolu sistematično vgradili sidra visoke nosilnosti, do leta 1970 pa je bila izvedba tehnike sidranja že uveljavljena praksa, pri čemer je bila pozornost že usmerjena v določene teoretične vidike, kot so prenos obtežbe, lezenje in protikorozijska zaščita, razvita pa so že bila prva semiempirična pravila projektiranja. Sidra so se po dostopnem viru (Xanthakos, 1991) kot osrednja tema prvič pojavila na konferenci leta 1974, ki je bila izvedena v organizaciji ICE (Institution of Civil Engineers).

5.5 Praksa sidranja v Avstriji

Zaradi prevladujočih geoloških in topografskih pogojev gradnja modernih prometnic v Avstriji brez razpoložljive primerne tehnologije sidranja ne bi bila mogoča, pri čemer uporaba prednapetih kamninskih in zemeljskih sider že desetletja predstavlja cenjeno in preskušeno metodo gradnje (Xanthakos, 1991). Leta 1966 so bili zaradi gradnje avtoceste prisiljeni prvič uporabiti metodo sidranja od zgoraj navzdol (angl. top-to-bottom technique) grajskega zidu v Innsbrucku, ki se je nato uveljavila kot metoda gradnje sidranih objektov v nestabilnih kamninah, pri kateri z uvedbo relativno nizkih sidrnih sil preprečujemo zdrse zaledij, s čimer se izognemo tradicionalni tehniki opiranja izkopov.

Podobni problemi temeljenja so se pojavljali tudi pri gradnji železnic, pri umiku hrupnega prometa pod raven terena kot tudi pri izvedbi globokih gradbenih jam v urbanih okoljih, kjer naraščajoče cene zemljišč vodijo v vedno višje zahteve po gospodarnem izkoristku zemljišč, kar se odraža v vedno večjem številu podzemnih garaž. S povečevanjem globin gradbenih jam so zahteve za učinkovito opiranje sten teh jam vedno večje, zato se uporabi prednapetih geotehničnih sider ni več mogoče izogniti. V sedemdesetih so spoznali vsestranske možnosti uporabe prednapetih sider, povečano povpraševanje na trgu pa je sprožilo začetek naglega tehnološkega razvoja, ki pa ni zajemal le zasnovo sider, ampak tudi uspešno uporabo nujno potrebnih

tehniki vrtanja in injektiranja. Ta razvoj je na eni strani vodil v povečanje nosilnosti, dosežene preko razširitev vrtine, razpiranja veznega dela in poinjektiranja, na drugi strani pa tudi v izboljšanje protikorozijske zaščite. Hkrati so bile uvedene pomembne izboljšave tudi na področju vrtalne opreme, ki je s tehničnega kot tudi gospodarskega vidika omogočila izvedbo sider dolžin do 100 m. Leta 1976 so na Dunaju prvič vgradili geotehnična sidra, ki so jih kasneje lahko v celoti odstranili.

Spomladi 1978 je bil v Avstriji izdan nacionalni standard ÖNORM B 4455, ki je bil prvič predelan leta 1985. Rezultat tega razvojnega obdobja je bilo moderno sidro, izdelano iz kakovostnih materialov, ki je bilo zaradi posebnih ukrepov protikorozijske zaščite primerno za uporabo v agresivnem okolju, katerega primernost je bila dokazana v postopku pridobitve nacionalnega tehničnega soglasja (Tischler, 1995).

5.6 Praksa sidranja v Združenih državah Amerike

V ZDA so izvajalci v petdesetih za začasno podpiranje sten globokih izkopov začeli vgrajevati prednapeta sidra z nosilnostmi med 180 in 890 kN. Prednapeta sidra so sprva izvajali v vezljivih zemljinah, pri čemer so vrtine v območjih veznih delov sider vrtali kot ravne vrtine ali pa kot ravne vrtine z enojno stožčasto razširitvijo. V zgodnjih šestdesetih so v ZDA za namene začasnih uporabe začeli vgrajevati sidra skozi votle svedre vrtalne garniture. Prva trajna prednapeta zemljinska sidra so vgradili leta 1961 za varovanje podpornega zidu ob avtocesti v Detroitu (Michigan, ZDA), pri čemer so sidra v zelo trde glin vgradili v ravne vrtine večjega premera z enojno stožčasto razširitvijo (Weatherby, 1982).

Zaradi visokih stroškov dela in tehnoloških problemov (protikorozijska zaščita, dolgoročno leženje, velike obremenitve glav sider in razvoj izvlečne odpornosti v potencialno aktivnih conah) je bila uporaba sidranja v ZDA do začetka sedemdesetih precej okrnjena. Eden od zgodnjih primerov sidranja s 300 sidri je bil uspešno izveden v sklopu izvedbe izkopa gradbene jame za poslovno zgradbo leta 1969 v Los Angelesu. Šele od leta 1970 naprej se je za sidranje začasnih sidrnih sten začela bolj splošna uporaba prednapetih geotehničnih sider. V začetku uporabe je bilo neuspešnih 20 % vseh preskusov nosilnosti na vgrajenih sidrih, sčasoma sta povpraševanje na trgu in povečan obseg dela vplivala na stroške dela in izboljšala kakovost izvedenih sidrnih del. Začetek obdobja širše uporabe sider je

znamenovala gradnja World Trade Centra v New Yorku, pri kateri je bilo za izvedbo izkopa gradbene jame globine 21 m treba vgraditi šest vrst geotehničnih sider projektne nosilnosti 2136 kN (Xanthakos, 1991).

Uporaba trajnih prednapetih geotehničnih sider v projektih javnega sektorja se sicer ni uveljavila do konca sedemdesetih, je pa začetek uporabe takih sider spodbudil dolgoročnega obnašanja zainjektiranih sider. Tako je leta 1979 U. S. Department of Transportation (FHWA – Federal Highway Administration) odobril demonstracijski projekt s trajnimi prednapetimi geotehničnimi sidri, v sklopu katerega so preučevali razpoložljive tehnologije sidranja in postopke vgradnje, iskali tehnološke rešitve za še ne dovolj raziskana in dodelana področja, pripravili pa so tudi osnutek priročnika za projektiranje. V sklopu tega projekta so bila sidra vgrajena na petih sidranih objektih avtocestnega omrežja, do danes pa se je sidranje uveljavilo kot popolnoma običajen ukrep.

5.7 Praksa sidranja v Avstraliji

Trajna prednapeta geotehnična sidra visokih nosilnosti se v Avstraliji že dolgo vrsto let uporabljajo za ojačitev betonskih masivnih pregrad. V obdobju med letoma 1958 in 1974 so s sidri s polno povezavo ojačili vsaj 16 velikih pregrad, pri čemer so sidra zainjektirali v dveh fazah: po vstavitvi sidra v vrtino so najprej zalili vezni del sidra, po doseženi trdnosti injekcijske mase so sidro napeli in zaklinili, nakar so zalili še žice v prostem delu sidra. V sredini sedemdesetih so spoznali, da bo večje število pregrad treba ojačiti, saj pri pregradah, zgrajenih do leta 1946, niso upoštevali vpliva vzgonskih sil hidrostatičnega vodnega tlaka pod pregrado, poleg tega pa sodobne metode za oceno meteoroloških vplivov kažejo, da so bile prvotne projektne ravni poplavnih voda precej podcenjene. Hkrati se je pojavljala dvom o zanesljivosti injekcijske mase kot edinega protikorozijskega sredstva, izkazovala pa se je tudi potreba po možnosti preverjanja dejanskih sil v sidrih med njihovo življenjsko dobo. Prvi objekt, za katerega so razvili zaščitni ovoj vzdolž pramen, možnost spremljanja sil in spreminjanja sil v sidrih, je bil Manly Dam, v katerega so leta 1981 vgradili 46 sider s kablom, sestavljenim iz 24 pramenov $\varnothing 15,2$ mm mejne nosilnosti 6000 kN in maksimalne dolžine 43 m. Pri razvoju so uporabili vse razpoložljivo znanje in tehnologijo, pri čemer so upoštevali tudi izkušnje iz Evrope – s pomočjo uveljavljenega evropskega proizva-

jalca sider so posebno pozornost namenili trenju pramen v prostem delu sider, kar se je izkazalo kot še posebno pomembno pri prostih delih sider, daljših od 30 m, ter rebrastim zaščitnim cevem, saj so bile razpoložljive cevi na tržišču zaradi neprimerne profila reber in tanke stene cevi neprimerne, zato so bili prisiljeni izdelati posebne namenske rebraste polietilenske cevi z debelino stene cevi 2,5 mm. Na podlagi izpopolnjenih sider so v nadaljnjih 14 letih s trajnimi prednapetimi sidri ojačili še 14 pregrad, pri čemer so se stalno povečevale zahteve tako glede dolžine kot tudi nosilnosti sider, tako da so v Burrinjuck Dam leta 1994 vgradili 161 sider mejne nosilnosti 16,25 MN in dolžin med 76 in 128 m, pri čemer pa je na vseh sidrih možno spremljati in spreminjati silo v sidru. Zanimiva tehnološka podrobnost pri vgradnji teh sider je bilo vstavljanje sider v vrtine: zaradi velikih dimenzij in teže sider so v vrtino $\varnothing 310$ mm najprej spustili zaščitno rebrasto cev, preverili njeno tesnost in šele nato so v notranjost rebraste cevi spustili telo sidra, nakar so ponovno preverili tesnost zaščitnega ovoja. Za zalivanje sidra so za vezni in prosti del sider uporabili injekcijsko maso različne sestave, pri čemer so postopek injektiranja zaradi izredne dolžine opravili v treh fazah (Cavill, 1997).

5.8 Praksa sidranja drugod po svetu

Od leta 1958 so podporne stene, sidrane s trajnimi prednapetimi sidri, običajna metoda za varovanje brežin v Braziliji, pri čemer med pomembnejše izvedene projekte sidranj zagotovo lahko uvrstimo program preskušanj sider v zaglinjenih zemljinah, izveden v okviru izgradnje podzemne železnice v Sao Paolu koncem šestdesetih (Weatherby, 1982). Tudi sicer se v splošnem sidranje v Severni in Južni Ameriki uporablja zlasti v pozidanih območjih velemest; tako je bila npr. v Caracasu (Venezuela) večina podzemnih podpornih konstrukcij in podpiranj tal od zgodnjih sedemdesetih naprej izvedenih z uporabo trajnih geotehničnih sider. Na Daljnem vzhodu so sidra uporabljali v glavnem pri globokih izkopih objektov visokogradnje kot tudi pri gradnji objektov nizkogradnje, zato je bilo izvajanje sidranja usmerjeno predvsem v območja velemest: Tokio, Osaka in Singapur, pri čemer so bila sidra izvedena kot začasen ukrep, priljubljeni pa so bili tudi tipi odstranljivih sider (Xanthakos, 1991).

5.9 Praksa sidranja v Sloveniji

Pri uporabi geotehničnih sider pri nas smo v pretežni meri sledili izkušnjam in praksi držav

nemškega govornega področja. Koncem sedemdesetih so se v naši praksi že vgrajevala pri nas proizvedena sidra, v katera sta takrat edina proizvajalca sider v Sloveniji (Geološki zavod in ZRMK) vgrajevala uvožene jeklene palice proizvajalca Dywidag. Na območju nekdanje Jugoslavije se je med letoma 1950 in 1975 razvijal sistem prednapenjanja IMS, v katerem je bila predvidena uporaba gladke patentirane žice \varnothing 5, 7, 10 in 12 mm s skupnim zaklinjanjem vseh kotov s predvideno nosilnostjo kotov in opreme med 150 do 3200 kN, pri čemer se je za povečanje trenja v območju zaklinjenja uporabljal korund. Ta napenjalni sistem se je kasneje uporabljal tudi za napenjanje in zaklinjanje prednapetih geotehničnih sider (Jašarevič, 1987).

Na območju nekdanje Jugoslavije so se prednapeta sidra uporabljala v različne namene, od sidranja pri gradnjah ali rekonstrukcijah pregrad in hidrotehničnih konstrukcij, sidranja brežin, podpornih zidov, podzemnih prostorov, globokih usekov in gradbenih jam kot tudi pri sanaciji drsin in objektov (Jašarevič, 1987). Obstajajo tudi zapisi o uporabi začasnih prednapetih geotehničnih sider pri varovanju gradbenih jam v Sloveniji (na primer uporaba 4000 kN sider v gradbeni jami osmega agregata HE Fala, 500 kN sider v gradbeni jami Ploščadi Borisa Kraigherja v Ljubljani, varovanje gradbenih jam drsališča in bolnišnice v Mariboru (Štrucl in sod., 1983), (Jašarevič, 1987)), pri čemer so slovenski strokovnjaki zaradi pojava napetostne

korozije pri nekaterih od navedenih primerov že pred 30 leti raziskovali možnost razvoja trajnih geotehničnih sider z dvojno protikorozijsko zaščito (Štrucl in sod., 1983).

Na začetku osemdesetih v tedanji Jugoslaviji niso bili na voljo lastni tehnični predpisi za izvedbo in preiskave geotehničnih sider, zato sta se pri nas uporabljala nemška standarda DIN 4125-1 (1972) za časna sidra in DIN 4125-2 (1976) za trajna sidra. Kasneje so vrzel pomanjkanja lastnih predpisov za področje sidranja v sredini osemdesetih premoščali tudi z uporabo švicarskega standarda SIA 191 (1977) (Faith, 1985). Uveljavljenost švicarskih tehničnih predpisov pri nas dokazuje tudi njihova kasnejša uporaba, ko se je na začetku izvedbe Nacionalnega programa avtocest v Republiki Sloveniji (NPIA) izkazalo, da bo zaradi zahtevnosti umestitve avtocest v prostor nujno izvesti tudi številne sidrane objekte; tehnološki preboj pri izvedbi trajnih prednapetih geotehničnih sider smo v Sloveniji naredili leta 1996, ko smo uveljavili švicarsko priporočilo SIA V 191 (1995), takrat najmodernejši predpis tako s stališča protikorozijske zaščite kot tudi preskušanja nosilnosti sider. Od takrat naprej pri nas kot trajna prednapeta geotehnična sidra veljajo sidra s celovito protikorozijsko zaščito, s čimer smo v prakso uvedli sidra z enim od najboljših znanih konceptov protikorozijske zaščite. V letu 1997 smo v sklopu NPIA že izvedli prvi sidrani objekt, v katerega so bile vgrajena

trajna prednapeta geotehnična sidra s celovito protikorozijsko zaščito. Število vgrajenih trajnih prednapetih sider je z leti hitro naraščalo, tako da je bilo v zadnjih 15 letih samo za potrebe izgradnje ali obnove avtocestnega omrežja, železniških povezav in v okviru hidroenergetskih objektov po dostopnih podatkih izvedenih skupno več kot 110 sidranih objektov z več kot 12.000 vgrajenimi trajnimi prednapetimi geotehničnimi sidri. Vgrajena trajna prednapeta geotehnična sidra bodo – ob predpostavki kakovostne vgradnje skladno s potrjenimi izvedbenimi detajli in ob stalnem spremljanju njihovega stanja ter ustrezno prilagojenem vzdrževanju – lahko dolgoročno zagotavljala stabilnost brežin in sidranih objektov. Do sedaj se pri nas sistematični pregledi stanja vgrajenih trajnih prednapetih sider vsaj na prometnicah še niso izvajali. Tudi v tujini ugotavljajo, da periodičnim vzdrževalnim pregledom še ni posvečena zadostna pozornost, zlasti če upoštevamo, da so možnosti sanacije korozijsko poškodovanih sider omejene le na dostopne dele glav sider, pa še to le v primerih, ko jih odkrijemo pravočasno. Zato je naslednji nujen korak zagon sistematičnega izvajanja periodičnih pregledov sidranih objektov z vgrajenimi trajnimi prednapetimi geotehničnimi sidri, tako da bodo morebitne nedoslednosti pri izvedbi in nastale poškodbe odkrite in z minimalnimi stroški sanirane čim prej, hkrati pa bomo s tem podaljšali tudi življenjsko dobo sidranih objektov.

6 • SKLEP

V članku je na kratko predstavljen razvoj sistema prednapenjanja od prvih začetkov do naprednejših sistemov prednapenjanja, kasneje uporabljenih tudi pri izvedbi prednapetih geotehničnih sider. Sprva so takšna sidra vgrajevali v sklopu zagotavljanja stabilnosti posameznih pregrad, pri čemer so pridobljene izkušnje spodbudile razvoj in razširitev njihove uporabe. Poleg vidika zagotavljanja nosilnosti se je v praksi vedno bolj izpostavljal tudi vidik

trajnosti, kar je spodbudilo razvoj protikorozijske zaščite vgrajenih sider. Trajna prednapeta geotehnična sidra s celovito protikorozijsko zaščito, kot jih od leta 1997 vgrajujemo tudi pri nas, po tehnološkem razvoju že dosegajo zadovoljivo raven. Zasnovana in izvedena so tako, da se telo sidra vključno s protikorozijsko zaščito sestavi že v obratu, pri čemer kritično fazo predstavlja izvedba glave sidra na mestu vgradnje sidra, med katero obstoja

nevarnost vdora padavin ali površinske vode do jeklenih delov sider. Poleg tega lahko pri izvedbi protikorozijske zaščite glave sidra pride do nedoslednosti v obliki odstopanj od potrjenih izvedbenih detajlov oziroma uporabe nepotrjenih sestavnih komponent sider. Zato je za trajnost sider ključnega pomena dosledno upoštevanje določil podeljenih tehničnih soglasij in poostren nadzor skladiščenja, vgrajevanja in še zlasti izvajanja vseh ukrepov protikorozijske zaščite v času gradnje sidranih objektov kot tudi stalnega pregledovanja stanja in vzdrževanja vodotesnega stanja glav sider ves čas njihove predvidene življenjske dobe.

7 • LITERATURA

Barley, A. D., Theory and practice of the single bore multiple anchor system, international symposium on Anchors in theory and practice, Salzburg, A. A. Balkema, str. 293–301, 1995.

- Barley, A. D., The single bore multiple anchor system, international conference on Ground anchorages and anchored structures in service, ICE London, Thomas Telford, str. 65–75, 1997.
- Barrage - Cheurfas, objavljeno na: http://encyclopedie-afn.org/index.php/Barrage_-_Cheurfas, 2009.
- Cavill, B. A., Very high capacity ground anchors used in strengthening concrete gravity dams, international conference on Ground anchorages and anchored structures in service, ICE London, Thomas Telford, str. 262–271, 1997.
- Dausch, G., Kluckert, K. D., Aktueller Stand der Ankertechnik, Tiefbau TBG 45, 6, 397–404, 2001.
- Empfehlung SIA V 191, 1995, Vorgespannte Boden- und Felsanker. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Zürich: 64 str.
- Faith, Š., 1985, Priporočila za sidranje v zemljinah in hribinah, Gradbeni vestnik, 34, 3: 51–57.
- Fuzier, J. P., Eminent structural engineer: Eugène Freyssinet (1879–1962), Structural Engineering International 17, 3, 264–265, 2007.
- Gilbert, R. I., Mickleborough, N. C., Design of prestressed concrete, London, Spon Press, 2004.
- Giovannardi, F., With Eugène Freyssinet beyond the limits of reinforced concrete, objavljeno na: http://www.giovannardierontini.it/Pubblicazioni/Versioni%20Inglese/with_Eugene_Freyssinet_beyond_the_limits_of_reinforced_concrete.pdf, 2009.
- Hunkeler F. et al., Spannglieder, Schrägseile und Anker – Beschreibung der Systeme und Erkenntnisse aus Korrosionsschäden, Zürich, Eidgenössisches Department für Umwelt, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Strassen, 2005.
- Jašarević, I., 1987, Geotehnička sidra i sidrene konstrukcije, Društvo građevinskih inženjera i tehničara, Zagreb, 408 str.
- Klemenc, I., Pregled razvoja trajnih prednapetih geotehničnih sider in izkušnje opravljenih pregledov sidranih objektov, Razprave 5. posvetovanja slovenskih geotehnikov, Nova Gorica, Slovensko geotehnično društvo, str. 213–222, 2008.
- Klemenc, I., Kuhar, V., Some examples of the poor installation of electrically isolated prestressed ground anchors in Slovenia, international conference on Ground anchorages and anchored structures in service 2007, ICE London, Thomas Telford, str. 43–52, 2008.
- Meiniger, W., 30 Jahre Erfahrung mit Dauerankern, Bauen in Boden und Fels, 3. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, Ostfildern, Technische Akademie Esslingen, str. 589–599, 2002.
- ÖNORM B 4455:1992, Erd- und Grundbau, Vorgespannte Anker für Festgestein und Lockergestein.
- Priporočila za sidranje v zemljinah in hribinah SIA 191, prevod Norm SIA 191, 1977, Boden- und Felsanker, Zveza društev gradbenih inženirjev in tehnikov Slovenije, Sekcija gradbenih konstruktorjev, 1977.
- SIA 267:2003, Geotechnik.
- SIA 267/1:2003, Geotechnik, Ergänzende Festlegungen.
- Sistemi prednaprejanja Instituta IMS, objavljeno na: www.institutims.rs/docs/Razvoj%20sistema%20prednaprejanja.ppt, 2009.
- Štrucl, V., Gostič, B., Belšak, D., 1983. Temeljne raziskave za razvoj trajnega sidra, raziskovalno poročilo, Ljubljana, RSS: 1 zv. (loč. pag.).
- Tischler, W., 30 Jahre Ankertechnik in Österreich, Technologische Entwicklung aufgrund praktischer Erfahrungen, international symposium on Anchors in theory and practice, Salzburg, A. A. Balkema, str. 387–392, 1995.
- Xanthakos, P. P., Ground anchors and anchored structures, New York, John Wiley & Sons, 1991.
- Weatherby, D. E., Tiebacks, final report, Washington, D. C., US Department of Transportation, FHWA, FHWA/RD-82/047, July 1982, objavljeno na: <http://isddc.dot.gov/OLPFiles/FHWA/009770.pdf>, 1982.
- Wichter, L., Meiniger, W., Verankerungen und Vernagelungen im Grundbau, Berlin, Ernst & Sohn, 2000.
- Wilson, H. M., Manual of irrigation engineering, Hubbard Press, objavljeno na: http://books.google.si/books?id=TcSepMP9G3IC&printsec=frontcover&dq=inauthor:%22Herbert+Michael+Wilson%22&source=gbs_book_other_versions_r&cad=9#v=onepage&q=&f=false, 2008.
- Zilch, K., Weiher, H., 120 Jahre Spannbetonbau – von Doehring und Jackson bis Heute, Beton- und Stahlbetonbau 103, 6, str. 422–430, 2008.