

UNIVERZA V MARIBORU
FAKULTETA ZA GRADBENIŠTVO, PROMETNO INŽENIRSTVO IN
ARHITEKTURO

Matevž Podbreznik

**SIMULACIJA DREVESNEGA KORENINSKEGA
SISTEMA KOT OSNOVA ZA NAČRTOVANJE
TEMELJENJA V GRADBENIŠTVU**

Diplomsko delo

Celje, september 2016



Univerza v Mariboru

Fakulteta za gradbeništvo,
prometno inženirstvo in arhitekturo

Diplomsko delo visokošolskega študijskega programa

**SIMULACIJA DREVESNEGA KORENINSKEGA SISTEMA, KOT OSNOVA ZA
NAČRTOVANJE TEMELJENJA V GRADBENIŠTVU**

Študent: Matevž PODBREZNIK

Študijski program: visokošolski, Gradbeništvo

Smer/ Modul: Konstrukcijska

Mentor: izr.prof.dr. Bojan Žlender univ.dipl.inž.grad.

Somentor: asis.dr. Primož Jelušič univ.dipl.gosp.inž

Celje, september 2016



Univerza v Mariboru

Fakulteta za gradbeništvo,
prometno inženirstvo in arhitekturo

Smetanova ulica 17
2000 Maribor, Slovenija

Številka: 93649578 - DD
Maribor, 07.04.2016

Na osnovi 330. člena Statuta Univerze v Mariboru (Ur. l. RS, št. 44/2015) izdajam

SKLEP O DIPLOMSKEM DELU

Matevž Podbreznik, študent(ka) visokošolskega strokovnega študijskega programa GRADBENIŠTVO, smer OPERATIVNO-KONSTRUKCIJSKA SMER, se dovoljuje izdelati diplomsko delo.

MENTOR(ICA): izr. prof. dr. Bojan Žlender
SOMENTOR(ICA): asist. dr. Primož Jelušič

Naslov diplomskega dela:

SIMULACIJA DREVESNEGA KORENINSKEGA SISTEMA, KOT OSNOVA ZA NAČRTOVANJE TEMELJENJA

Naslov diplomskega dela v angleškem jeziku:

SIMULATION OF TREE ROOTS SYSTEM AS A BASE FOR DESIGNING OF FOUNDATIONS

Diplomsko delo je potrebno izdelati skladno z "Navodili za izdelavo diplomskega dela" in ga oddati v treh izvodih ter en izvod elektronske verzije v referatu za študentske zadeve. Rok za zaključek študija je 30. 9. 2016.

Pravni pouk: Zoper ta sklep je možna pritožba na senat članice v roku 3 delovnih dni.

Obvestiti:

- kandidata -ko,
- mentorja,
- somentorja,
- odložiti v arhiv



DEKAN
red. prof. dr. Miroslav Premrov



ZAHVALA

Hvala vsem vam, ki moj vedoželjen duh pustite blizu in mi dovolite, da se od vas učim.

SIMULACIJA DREVESNEGA KORENINSKEGA SISTEMA, KOT OSNOVA ZA NAČRTOVANJE TEMELJENJA

Ključne besede: gradbeništvo, geotehnična sidra, koreninski sistem, temeljenje, Biomimetika

UDK: 624.153.7(043.2)

Povzetek

Rziskovanje potencialov in prevod naravnih rešitev v gradbeno in tehnološko prakso. S poudarkom na koreninskem sistemu in njegovi pomembni vlogi pri razvoju temeljenja in geotehničnih objektov.

V delu preučujemo funkcije koreninskega sistema in jih ovrednotimo z gradbenega vidika. Ker je o koreninskem sistemu v tem smislu napisan in raziskano malo, vlečemo vzporednice z biološkimi raziskavami in trenutno gradbeno prakso in tako pridobimo vsaj nekaj tehničnih lastnosti koreninskega sistema. Pri koncu izpostavimo trenutno najboljšo simulacijo drevesnega koreninskega sistema v praksi. In z izračunom prikažemo njegovo uporabnost pri temeljenju.

SIMULATION OF A TREE ROOT SYSTEM AS A BASE FOR DESIGNING OF FOUNDATIONS

Key words: construction , geotechnical anchors, root system , foundation, Biomimetics

UDK: 624.153.7(043.2)

Abstract

Research of natural potentials and translation of solutions in the construction and engineering practice. With a focus on the root system and its important role in the development of foundations and geotechnical structures.

In our work we research the functions of a tree root system and evaluate them from a structural point of view. Because there is little written and researched in this sense we are evaluating parallels with some of biological research done and field technologies used in construction industry, all this of gaining some valid traits and specifications of tree root systems. In the end we highlight at the moment the best approximation of a geotechnical system to the root system in practical usage. And with an example show some of application options of such system in construction of foundations.

VSEBINA

1 UVOD	1
1.1 OPREDELITEV PROBLEMA DIPLOMSKE NALOGE	2
1.2 CILJ DIPLOMSKEGA DELA.....	3
1.3 TRENDI V GRADITELJSTVU	4
2 OBSTOJEČE ANALOGIJE MED GRADBENIŠTVOM IN NARAVO	5
2.1 BIOMIMETIKA.....	5
2.2 RAZVOJ BIOMIMETIČNIH SISTEMOV	5
2.3 OBLIKOVANJE IN DIMENZIONIRANJE PROCESA IN NAPREDEK	9
2.4 FUNKCIJSKO PODOBNI	10
2.4.1 TERMITNJAK : Sistem pasivne ventilacije na podlagi temperaturnih razlik.....	10
2.4.2 PRVI KOMPOZITI: Blato in slama kot gradbeni material.	12
2.4.3 SATOVJE ČEBEL.....	13
2.4.4 SAMO URBANIZACIJA: Najbolj učinkovita mrežna povezava v urbanih naseljih.	13
2.5 STRUKTURNO PODOBNI	16
2.5.1 DIATOMKE IN RADIOLARIJA	16
2.5.2 NOSILNE GRADBENE STRUKTURE PO VZORU KOSTI: Ali je kaj trden most?.....	17
2.5.3 LUPINE ŠKOLJK: Lahke in trdne strukture.	19
2.5.4 PNEU: Kako trden je zrak?.....	21
2.5.5 NADZEMNE DREVESNE STRUKTURE.....	23
3 KORENINSKI SISTEM.....	24
3.1 OBSEG IN OBLIKE KORENINSKIH SISTEMOV	24
3.1.1 OBSEG.....	25
3.1.2 OBLIKA.....	26
3.2 RAST IN RAZVOJ KORENINSKEGA SISTEMA.....	27
3.3 GEOMEHANSKA FUNKCIJA	31
3.3.1 VODA	31
3.3.2 STRIŽNA ODPORNOST ZEMLJINE OB PRISOTNOSTI KS.....	32
3.3.3 OPORNOST KORENINSKE GA SISTEMA NA IZVLEK	38

3.3.4 RAZISKAVA NATEZNE TRDNOSTI KORENIN IN POVRŠINE PREREZA KORENIN NA ENOTI POVRŠINE ZEMLJINE (Brischetti, Chiaradia; Root strenght and root area ratio of forests species in Lombardi; 2005).....	39
3.4 TRENUTNA UPORABA KS IN DREVES V GRADBENIŠTVU IN ARHITEKTURI	42
3.4.1 DREVESNE HIŠE	42
3.4.2 POHIŠTVO KI ZRASTE – FULLGROWN	43
4 GEOTEHNIČNI OBJEKTI – SPINNANKER (temeljno sidro).....	44
5 IZRAČUN PRAKTIČNEGA PRIMERA UPORABE SISTEMA SPINNANKOR.....	48
5.1 TEHNIČNI OPIS.....	48
5.2 GEOMETRIJSKA ZASNOVA	48
5.3 IZRAČUN	49
6 ZAKLJUČEK.....	56
7 VIRI	57
8 PRILOGE	60
8.1 SEZNAM SLIK	60
8.2 SEZNAM TABEL.....	62
8.3 NASLOV ŠTUDENTA	63
8.4 KRATEK ŽIVLJENJEPIS.....	63

UPORABLJENI SIMBOLI

L_i	dolžina elementa
f	faktor razmerja dolžin
γ_i	faktorji po EC 7
H_B	horizontalna sila v podpori
p_H	horizontalni pasivni tlak
R_a	izvlečna sila sider
q_i	obtežba
$V_{anc,potr}$	potrebna sidrna sila
R_{Ea}	projektna izvlečna sila sider
e	raster
P_H	rezultanta pasivnega tlaka
G_i	rezultanta lastne teže
Q_i	rezultanta obtežbe
V_{anc}	sidrna sila
V_i	vertikalna sila v podpori

1 UVOD

Izvor potrebe po grajenju, snovanju in konstruiranju je čisto eksistenčne narave in tesno povezan s človeško ambicijo po doseganju ciljev.

Ker je tema, ki jo obravnavamo v diplomskem delu v širšem pomenu, odnos narave in tehnike, bomo poleg tehničnega dela diplomske naloge, kjer poskušamo primerjati in ovrednotiti različne smiselne analogije med tema dvema področjema, v uvodu poskušali orisati tudi izvor odnosa in ideologijo, ki jo do narave gojimo ljudje.

Narava je za človeštvo pogoj, če je to vse kar od nje vzamemo. Narava je baza, če to potrebujemo in je učiteljica če smo vedoželjni. In takšni bi naj bili študenti: vedoželjni, kritični in pravični.

VIZIJA FGPA

Izsek teksta, ki na spletni strani predstavlja vizijo FGPA, o programih, ki jih izvaja;

» Ti bodo v največji možni meri aktivirali in razvijali motivacijo, potenciale, znanje, razumevanje, ustvarjalnost in sposobnosti tako študentov kot učiteljev in raziskovalcev. «

POSLANSTVO HARVARD COLLEGE

Izsek in prevod teksta, ki na spletni strani predstavlja vizijo Harvard college o tem kaj naj bi vzpodbudili njihovi programi pri študentih;

“From this we hope that students will begin to fashion their lives by gaining a sense of what they want to do with their gifts and talents, assessing their values and interests, and learning how they can best serve the world.» (HC).

»Od tu upamo, da bodo študentje pričeli oblikovati svoje življenje v smislu kaj bi radi poželi s svojimi dari in talenti, ocenili svoje vrednote in interese ter se naučili kako lahko najbolje pripomorejo v svetu« (HC).

Ved in znanstvenih smeri za preučevanje narave je veliko in delujejo na mnogih področjih. Zato se v delu ne omejimo na specifično ampak črpamo vire, ki so nam pomembni za čim boljše in kar se da objektivno delo.

Po bolj splošnem začetku se za vsebinski del osredotočimo na analogijo koreninskega sistema v tehnologiji grajenja z motivom po večji razpoznavnosti področja geomehanike kot pomembno in neredko zapostavljeno področje gradbeništva. Tu imamo v mislih predvsem projektiranje in gradnjo enostavnih, nezahtevnih in manj zahtevnih gradbenih objektov. Pri prej naštetih projektih zaradi manjšega obsega del predimenzionirani elementi stroškovno ne opravičijo razmisleka, kar pa še ne pomeni, da zanj ni prostora in da v večini primerov ni potreben in dobrodošel. In je, če stremimo k optimizaciji gradbenih objektov, potreben za razvoj znanosti in tehnologije.

1.1 OPREDELITEV PROBLEMA DIPLOMSKE NALOGE

Namen diplomskega dela je raziskati, preučiti, analizirati, preizkusiti, primerjati in ovrednotiti oblike geotehničnih objektov, ki jih izvaja tehnična stroka z obliko naravnega izvora. Delo temelji na predpostavki, da je način temeljenja razvit s strani narave optimalen.

V začetnih raziskavah virov pri pripravi teme diplomskega dela je do sedaj najbolj znana oblika temeljenja in izboljšave zemljine, ki izhaja iz narave, koreninski sistem. Zato se za ta čas koncentrirajmo na analogijo med različnimi koreninskimi sistemi ter raznimi oblikami geotehničnih objektov v uporabi.

Prvi sklop diplomskega dela je sestavljen iz raziskav. Najprej na dveh vzporednih področjih, tehnološkem in biološkem z namenom združitve obeh področij proti koncu diplomskega dela. Tu pričakujemo veliko samostojnega raziskovalnega dela, sodelovanja s stroko na obeh področjih z namenom pridobiti specifične in tehtne informacije in že obstoječe analize.

V drugem delu diplomskega dela primerjamo posamezne lastnosti in iščemo vzporednice. Na podlagi dobljenih rezultatov predvidimo potrebne geofizikalne in strukturne lastnosti idealnega geotehničnega objekta.

Tretji praktični del zajema opise postopkov in rezultatov prenosa zastavljenih ciljev v prakso. Opredelitev postopkov pridobivanja empiričnih rezultatov, detajlov izvedbe, tabel

preverjanj, itd. Ne nazadnje tudi praktično zasnovo novo zastavljenega idealnega koncepta in na koncu povzetek vsega opravljenega z ugotovitvijo, kako blizu lahko s trenutno tehnologijo pridemo funkciji koreninskega sistema oz. bioloških geotehničnih objektov.

1.2 CILJ DIPLOMSKEGA DELA

Povzeti in čim bolj potanko definirati posamezne lastnosti vsake razvojne osi geotehnologije (naravno in umetno). Ugotoviti preseke le teh in posamezne primere tam kjer je možno in smotrno, analizirati z računskimi metodami in teze dokazati z empiričnimi poizkusi. Pri tem je v ozadju ideja oblikovati dobro in tehnološko izvedljivo obliko temeljenja oziroma izboljšave tal. Naj diplomsko delo služi kot pobuda za razmislek in obsežnejše nadaljnje znanstvene raziskave na področju.

Zavedamo se, da je področje še relativno neraziskano. Sicer so strokovnjaki na vsakem posameznem področju zelo razvojno naravnani in dosegajo konstantni napredek pri svojem delu, ni pa zaslediti križnih referenc med obema srenjama. Predvidevamo, da za to obstaja razlog, namen te diplomske naloge pa ga je natančneje raziskati. Pričakujemo izzive pri geomehanski in trdnostni analizi koreninskih sistemov in ekvivalentno veliko iznajdljivost pri implementaciji dodatnih funkcij in interakcij, ki jih ima koreninski sistem z obdajajočo zemljino pri umetno narejenih geotehničnih objektih.

1.3 TRENDI V GRADITELJSTVU

Tako kot vse na svetu se spreminjata tudi gradbeništvu in arhitektura, predvsem v zadnjem obdobju se zelo hitro razvijata. Na začetku so bili motivi pogojeni z naravo, rezultati gradenj pa podobni naravnim rešitvam. V srednjem obdobju postavljamo v ospredje družbene motive in snujemo gradbene rešitve, ki jih družba sprejema, vendar se ideološko oddaljujejo od narave. Cikel se ponovno vrača na začetek. Tako je obdobje pravšnje za poglobljene raziskave narave in njenih konceptov grajenja in snovanja, s čimer se ukvarjamo tudi v tej nalogi.

Trenutno popularno izrazoslovje trenda v graditeljstvu zajema:

- trajnostni razvoj,
- nizki stroški proizvodnje,
- uporaba recikliranega materiala,
- ogljični odtis proizvedenega produkta,
- življenjska doba objekta,
- moralna odgovornost proizvodnega procesa,
- optimizacija produktov,
- optimizacija tehnološkega procesa,
- avtomatizacija,
- in ostalo.

2 OBSTOJEČE ANALOGIJE MED GRADBENIŠTVOM IN NARAVO

2.1 BIOMIMETIKA

Biomimetika se kot znanstvena disciplina sistematično ukvarja s tehnično implementacijo in aplikacijo strukturnih sistemov, procesov in razvojnih zakonitosti bioloških sistemov. V osnovi jo lahko delimo na strukturno biomimetiko in procesno biomimetiko. Ne smatramo jo kot brezciljno imitacijo narave in naravnih materialov, ampak kot način razumevanja naravnih principov, postavljanja tehničnih vprašanj in rešitev, ki jih s pravilno tehnologijo implementiramo v prakso (Pohl & Nachtigal, 2015).



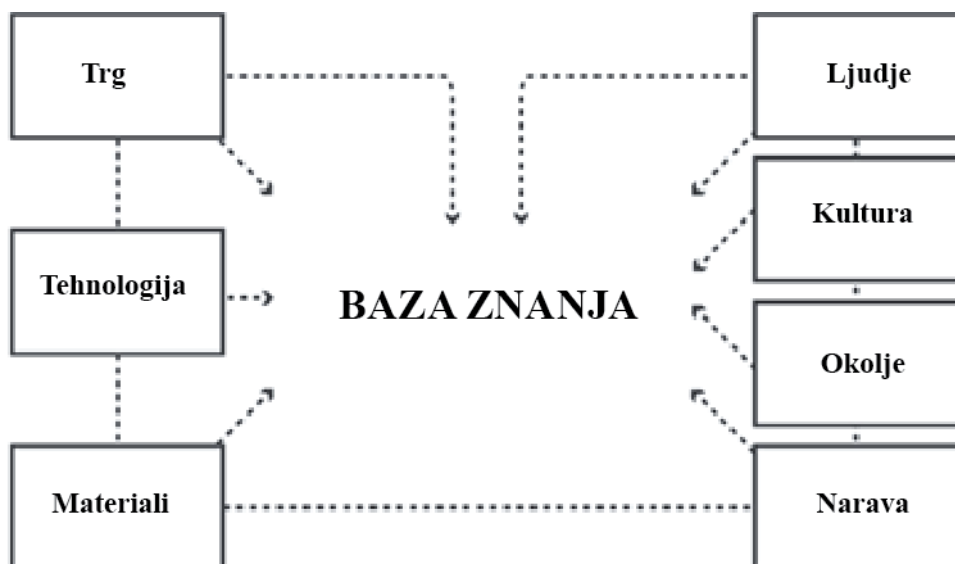
Slika 2.1: Gradnja planetarija v mestu Jena, Nemčija 1925 (Pohl & Nachtigal, 2015).

2.2 RAZVOJ BIOMIMETIČNIH SISTEMOV

Princip poteka raziskav je torej analogen, soroden, kot rezultat analognega razvoja pa dobimo analogni sistem. V gradbenem smislu je rezultat analogna struktura in v našem primeru po analognem sistemu razvijamo in iščemo rešitve za snovanje optimalne oblike temeljenja.

Analogija po SSKJ; -e ž (i) *pojavnost, ki postane zaradi sorodnih, vzporednih vzrokov (skoraj) enak drugemu pojavu*: problemi v znanosti imajo analogije tudi v umetnosti; iskati, najti analogije / medsebojna, očitna analogija; nastati, razlagati si, sklepati po analogiji
 ♦ lingv. *uravnava jezikovne prvine po podobnem vzorcu*, ♦ *biol. analogni organi po funkciji podobni organi različnega nastanka in zgradbe (SSKJ)*.

Takšni sistemi se lahko v principu razvijejo na dva načina: Biology Push in Technology Pull (biologija potiska in tehnologija vleče). Pri Push načinu narava dejansko služi kot ideja ali povod za razvoj določene tehnologije ali sistema, kateri se v nadaljnje razvija pod okriljem znanosti in tehnologije ali pa se razvoj prične samoiniciativno in izhaja iz potrebe po tehnološki rešitvi (princip Pull). Tekom razvoja (lahko tudi čisto na koncu) se vzpostavijo podobnosti s sistemi iz narave. Z razvojem in uporabo tehničnega znanja lahko naravne strukture veliko bolj razumemo in si lažje predstavljamo procese grajenja oz. rasti. Tretja oblika raziskovalne metode, katero bomo pri našem delu še najbolj uporabljali, je Pool research (baza znanja), ki jo sestavlja nabor osnovnega znanja iz različnih področij, ki nas zanimajo in jih želimo vključiti pri razvoju. Pri tej metodi je cilj začrtan, vendar so postopki manj linearni in pokrivajo širši spekter informacij.



Slika 2.2: Pool research, metoda raziskovanja (Pohl & Nachtigal, 2015).

Praktičen primer je resnična zgodba o hortikulturistu iz Pariza, Josephu Monierju, kako se je spoprijel s problemom dragih in krhkih cvetličnih loncev iz gline. Potreboval je tehnološko rešitev in inspiracijo črpal iz narave. Natančneje iz mesnatih listov kaktusa *Opuntia* (sl. 2.3) in mrežaste strukture, ki mu daje trdnost. Tako je leta 1880 naredil cvetlični lonec z multi-komponentno strukturo, tako je jeklen koš nadomestil mrežasto strukturo in daje natezno trdnost ter služi kot struktura za ohranjanje oblike tlačno odpornega cementa. Rezultat je tipično biomimetičen. Iz narave je izvzel funkcijo (kar je potreboval) in uporabil razpoložljivo tehnologijo. Tako smo dobili novo področje gradbenih elementov, armirano betonske strukture.



Slika 2.3: Kaktus *Opuntia* (levo) in njegova olesenela struktura (desno) (Pohl & Nachtigal, 2015).

Hiter tehnični razvoj zadnjih let nam delovanje in snovanje narave tolmači dokaj plastično. Medtem, ko narava snuje na podlagi genskih in dednih zapisov, “kode”, ki se prenaša iz generacije v generacijo, lahko ljudje, ki smo razvili svojo računalniško kodo s širokim spektrom različnih metod in programom, razumemo obremenitve strukturnih elementov, njihove funkcije, interakcijo z okoljem in napetosti, ki se pod različnimi okoliščinami v njih pojavljajo. Simuliramo procese grajenja in tako poskušamo nadoknaditi tisočletja izkušenj, ki jih nosi narava. Vendar se je potrebno zavedati, da je prav narava pripomogla k razvoju CAD (computer aided design) in CAO (computer aided optimisation) sistemov, konkretno gospodu C. Matthecku, ki je skrbno opazoval drevesne strukture.

Pri odgovornem snovanju s ciljem narediti funkcionalno in v okolje umeščeno strukturo je potreben dialog. In na nas je, da presežemo v glavnini relativno ozko usmerjen pogovor med investitorjem, projektantom, izvajalcem in pristojnim organom ter bolj vključimo

naravo in okolje. Primeri dobre prakse se seveda že pojavljajo in zavedanje prednosti takšnega pristopa se krepi... limone pač ne rastejo v puščavi.



Slika 2.4: Urbanizacija Dubaja; Prikazana je intenzivna urbanizacija mesta v obdobju 30 let (Fazli & Faridi).

2.3 OBLIKOVANJE IN DIMENZIONIRANJE; PROCES IN NAPREDEK

Tehnološki razvoj in razvoj računalniških orodij čedalje bolj sooblikujeta način dela in smer razvoja v gradbeništvu in arhitekturi. Computer aided design (krajše CAD) programi nam omogočajo vedno bolj natančnejšo simulacijo naravnih struktur. Tako jih lahko ovrednotimo in predvidimo njihovo obnašanje pod zelenimi pogoji. Ob takšni podpori so odločitve v fazi oblikovanja in projektiranja lažje, možnosti variantnih rešitev je na koncu manj, izvedba projektov pa hitrejša in natančnejša. Simuliramo lahko teoretično vse, od gibanja množic, plinov, do zahtevnih konstrukcij in prenosi modelov iz računalniškega okolja čez noč dobijo otipljivo obliko s pomočjo 3D tiskalnikov.

Je pa dobro pripravo projektov težko ovrednotiti, ker je vsaka faza projekta po svoje pomembna in znatno pripomore k uspešni izvedbi.

»For good design as a creator and adder of value. Some decision makers have got the point; many important ones haven't. Why is this? One issue is that valuation and accounting methods often give low priority to design quality as a generator of value to business. I have already mentioned that many people also still perceive design to be about taste rather than about value creation. However, I think one of the biggest problems is complexity. Development is one of the most complex human undertakings. There are many variables that affect cost and value.« (Simmons, 2006)

»Dobro oblikovanje kot dodana vrednost. Nekateri odločevalci so razumeli, drugi pomembni niso. Zakaj je tako? Eden od vzrokov je, da metode ocenjevanja in vzročnosti dajejo premalo vrednosti oblikovanju kot generatorju vrednosti za posel. Veliko ljudi še vedno povezuje oblikovanje kot funkcijo okusa in ne kot vrednost. Kakorkoli, mislim, da je največji problem kompleksnost. Razvoj je ena izmed bolj kompleksnih človeških podvigov, kjer je veliko spremenljivk, ki vplivajo na ceno in vrednost.« (Simmons, 2006)

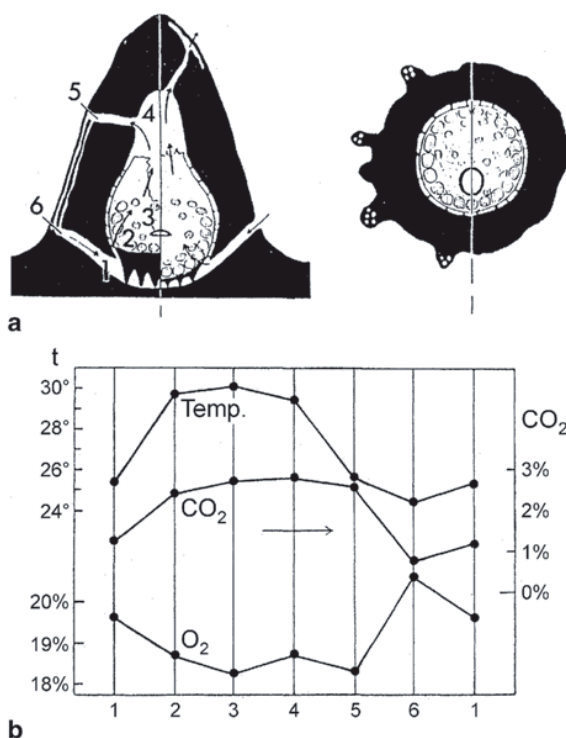
2.4 FUNKCIJSKO PODOBNI

2.4.1 TERMITNJAK Sistem pasivne ventilacije na podlagi temperaturnih razlik.

Elementi, ki jih uporabljajo termiti za hlajenje, so premišljeni, logični in učinkoviti. V jedru termitnjaka ohranjajo konstantno temperaturo 31°C, kljub zunanjim temperaturnim nihanjem od 3°C do 42 °C. To dosežejo z orientacijo tako, da je opoldanskemu močnemu soncu izpostavljena čim manjša površina. Kroženje zraka v zaprtem ali odprtem sistemu pa ohlaja svež zrak, ki se zajema na dnu termitnjaka in izhaja na vrhu. Hitrost kroženja zraka se lahko prilagaja z velikostjo dimnika na vrhu.

KROŽENJE ZRAKA V TERMITNJAKU

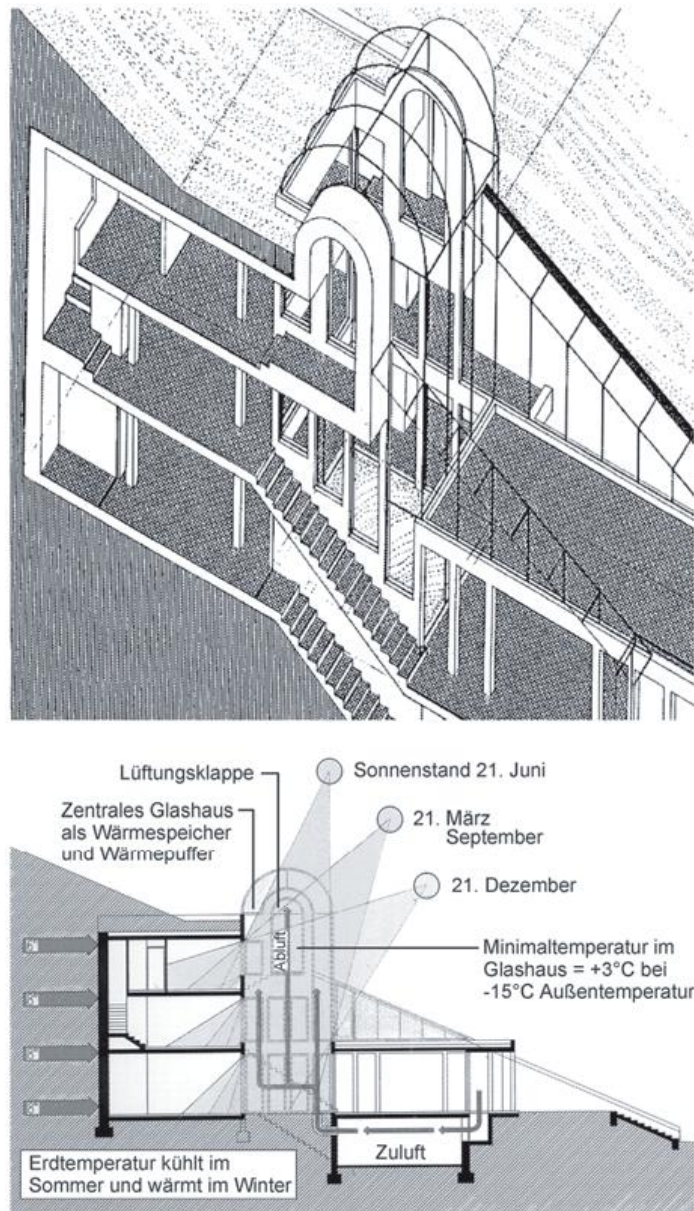
- 1 svež in vlažen zrak se dovaja preko spodnjih soban;
- 2,3 nato potuje do glavnih soban;
- 4 topel zrak se od soban dviga in nabira pod kupolo;
- 5 po odvodnem kanalu potuje zrak proti zunanosti strukture;
- 6 nato se vrača k dnu in se sproti skozi porozno strukturo obogati s kisikom.



Slika 2.5: Prerez dveh različnih tipov termitnjaka **a**, diagram koncentracij kisika in ogljikovega dioksida v termitnjaku **b** (Pohl & Nachtigal, 2015).

PRIMER V GRADNJI

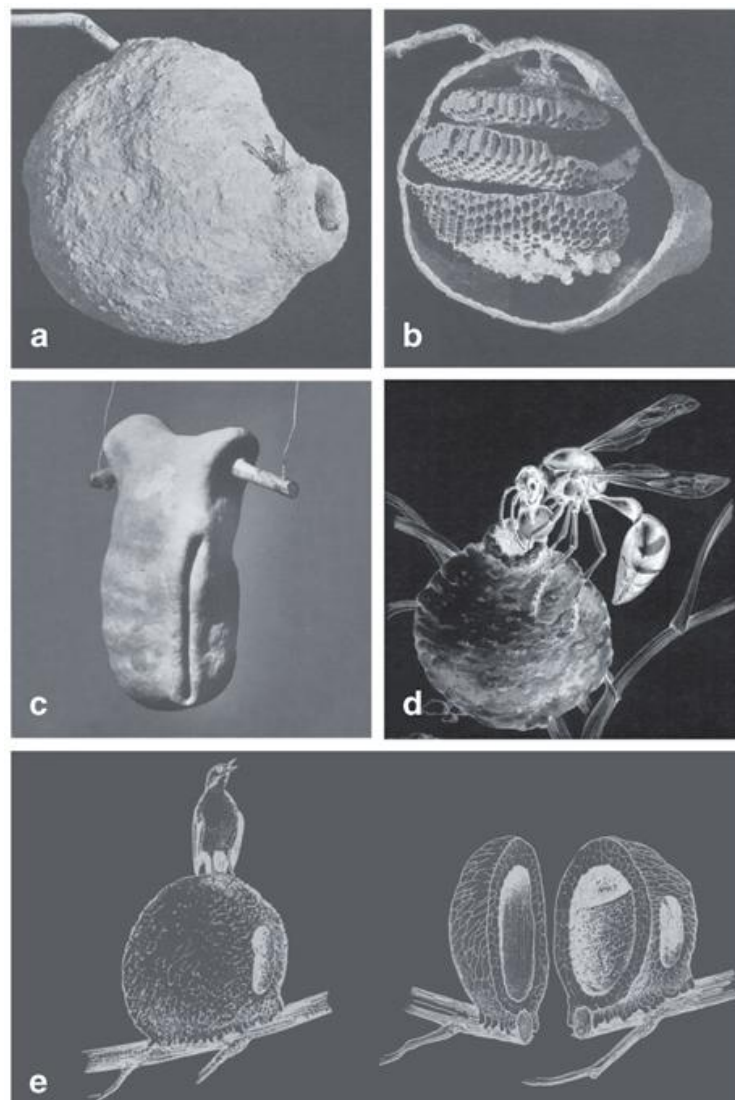
Objekt je pametno pozicioniran glede na sonce in izkoriška pasivni način prezračevanja na bazi temperaturnih razlik. Združuje sistem mravljišč in termitnjaka. Lokacija: Avstrija.



Slika 2.6: Primer objekta, zgrajenega na podlagi primera termitnjaka (Pohl & Nachtigal, 2015).

2.4.2 PRVI KOMPOZITI Blato in slama kot gradbeni material.

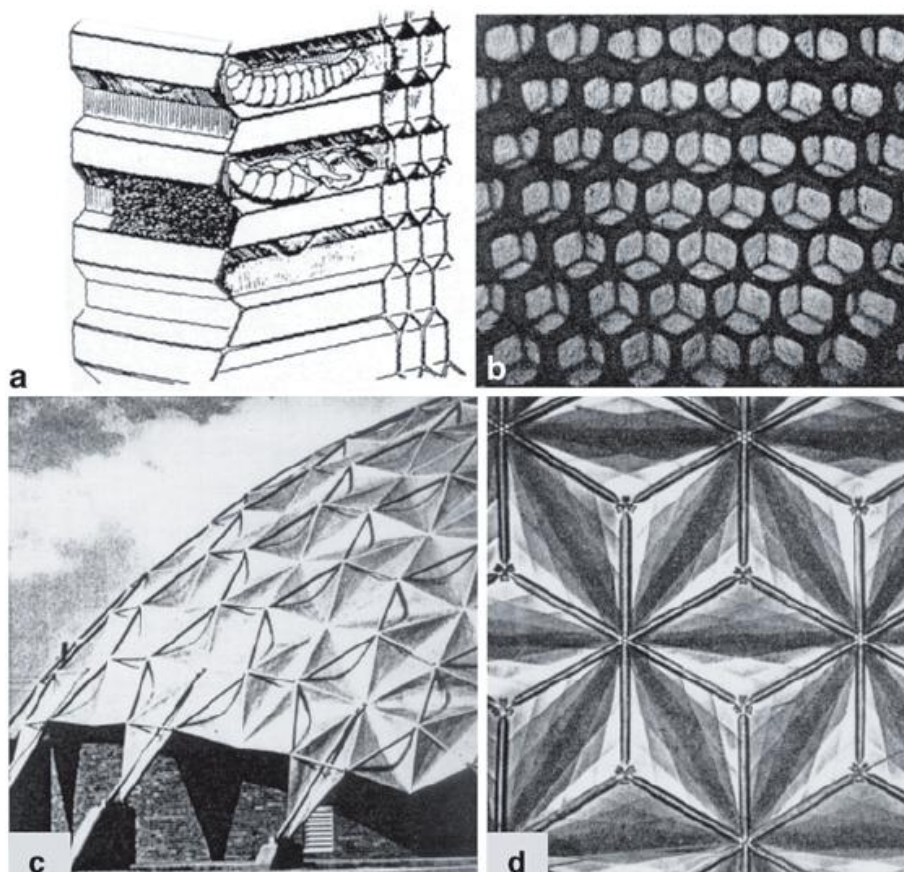
Do izuma opeke in betona je bila osnova za gradnjo hiš lesena nosilna konstrukcija, obložena z blatno slamnatim kompozitom, sistem se je sicer glede na regijo spreminjal. V podnebnih pasovih, kjer uživajo več sonca, so lahko v kratkem času izdelovali tudi opeke iz takšnega kompozita. Zgledovanje iz narave je v slikah očitno. V primerih (sl. 2.7) so uporabljena vezna sredstva, kot so vosek, slina in drugi izločki. Kot osnova pa razno drobno vejevje, listje in prežvečene kaše.



Slika 2.7: Živalska bivališča narejena iz kompozitnih materialov (Pohl & Nachtigal, 2015).

2.4.3 SATOVJE ČEBEL

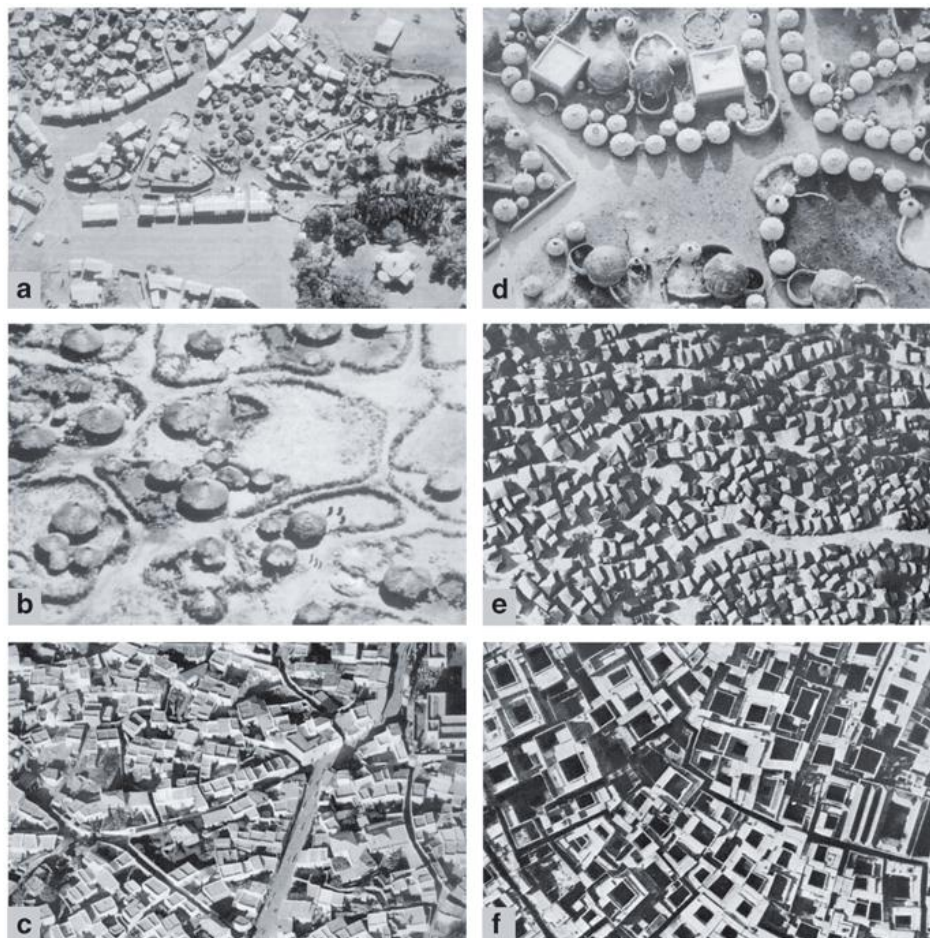
Heksagonalna oblika razdelkov je služila kot osnova za snovanje geodezičnih kupol in lamelnih struktur.



Slika 2.8: Satovje in heksagonalna konstrukcija: **a** in **b** prerez in pogled čebeljega satovja; **c** in **d** Kiosk, G. Pavlov (Pohl & Nachtigal, 2015).

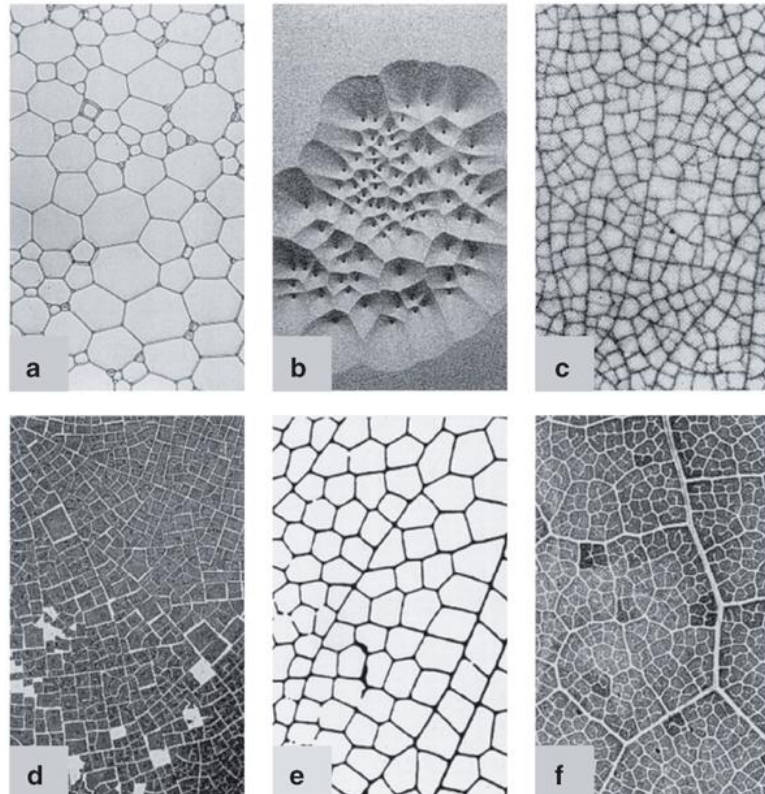
2.4.4 SAMO URBANIZACIJA: Najbolj učinkovita mrežna povezava v urbanih naseljih.

Dobre mrežne povezave so bistvenega pomena za kakovost življenja v strnjjenih naseljih. Razvoj naselij je lahko vzorčen primer Technology pull principa. Zaselki so oblikovani po potrebah skupnosti, ki na tem območju biva. Domnevno ljudje niso dajali pozornosti žilne strukture lista pred nastankom naselja. Kakorkoli, na koncu je podobnost očitna.



Slika 2.9: Naselbine v Afriki: **a** Soquota, Etiopija; **b** Neznana vas, Etiopija; **c** Hara, Etiopija; **d** Labbezanga, Niger; **e** Stari Zanzibar, **f** Staro jedro Marakesch, Maroko (Pohl & Nachtigal, 2015).

Na podlagi potreb po pretočnosti in komunikaciji se v naseljih organsko ustvarjajo povezovalne poti (sl. 2.9). Podobno kot v naravi so pomembne strukturne povezave, najkrajše poti prenosa hranil in drugih impulzov (sl. 2.10). Trendi zadnjih desetletij so čisto drugačni. Postavljamo ortogonalne infrastrukturne mreže z razlogom optimizacije in lažjega načina življenja. Na ta način mehaniziramo človeka in njegovo obliko gibanja in bivanja kot še eno od komponent pri velikem mestnem sistemskem mehanizmu (sl. 2.11).



Slika 2.10: Povezave med samoorganiziranimi strukturami: **a** milni mehurčki med ploščama stekla; **b** model prepuščanja peska; **c** razpokana struktura v porcelanu; **d** posušen vrhnji sloj želatine; **e** krilo kačjega pastirja, **f** javorjev list (Pohl & Nachtigal, 2015).

Mesto duhov ki ga postavljajo Kitajci. Na sliki še brez prebivalcev, ob dokončanju naj bi tu naselili 500.00 ljudi.

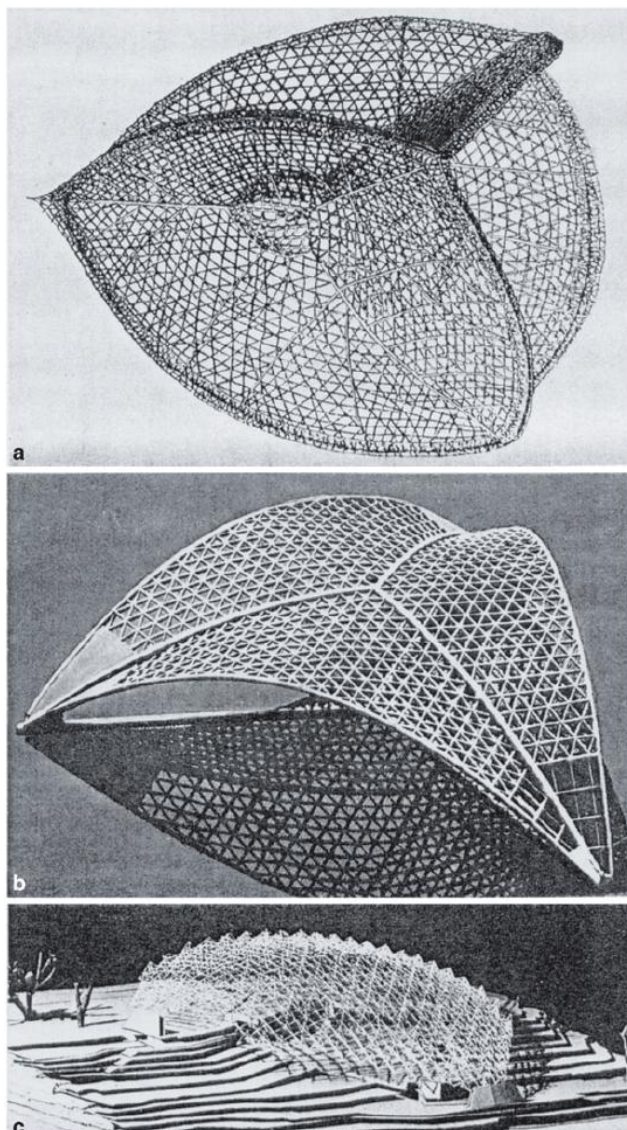


Slika 2.11: Kilamba, Angola(Wiki, Kilamba).

2.5 STRUKTURNO PODOBNI

2.5.1 DIATOMKE IN RADIOLARIJA

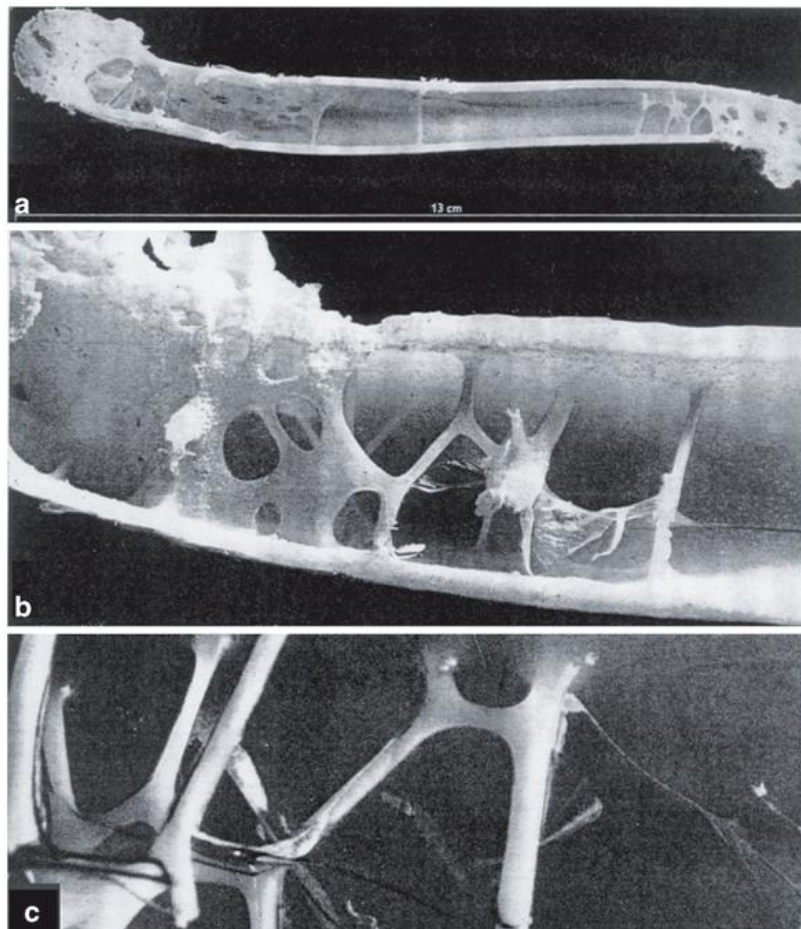
V bistvu gre za rastlinski del planktona, ki povezan v verige tvori alge. Kot ogrodje tvori silikatno volumensko strukturo z veliko sekundarnimi strukturami, ki se na koncu povezuje v sistem membran. Na bazi njihovih oblik (diatomka- krožna struktura, Radiolarija – omniformna) poznamo v gradbeništvu palične konstrukcije in hierarhijo gradbenih elementov (primarna, sekundarna,...).



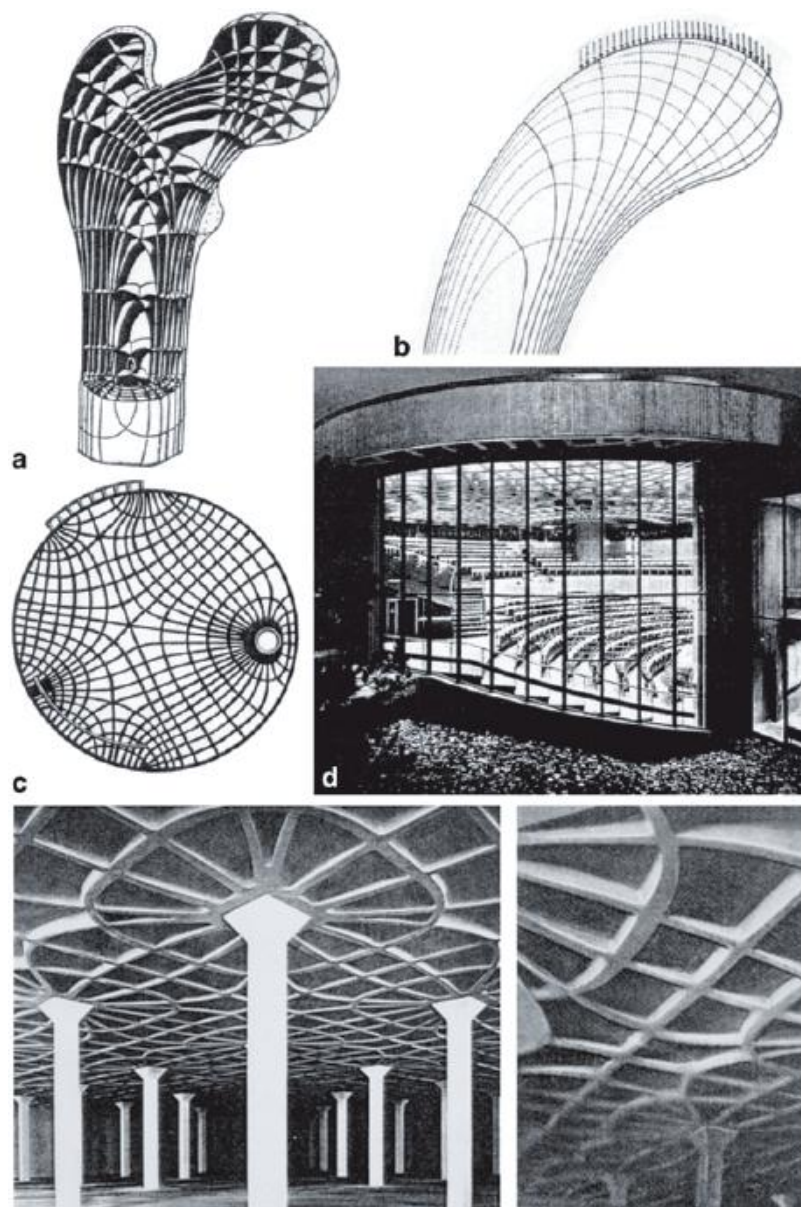
Slika 2.12: Radiolarija in strukturni sistemi po njenem vzoru; **a** radiolaria Callimitra; **b** tetraedrična palična struktura, P.C. Nervi, Pariz; **c** model z dolgim razponom, G Wujina, St. Petersburg (Pohl & Nachtigal, 2015).

2.5.2 NOSILNE GRADBENE STRUKTURE PO VZORU KOSTI: Ali je kaj trden most?

Struktura kosti (sl. 2.13) je takšna, da omogoča čim boljše razmerje med maso in trdnostjo. Predvsem dolge kosti so analogne tankostenskim palicam, v notranjosti ojačane z gobastim tkivom. Gobasto tkivo je manjše gostote kot zunanji ovoj in služi razporeditvi notranjih napetosti v kosti predvsem na koncih, kjer v stikih prihaja do večjih obremenitev. Analogni gradbeni elementi, ki povzemajo princip, so gobaste in rebraste plošče (sl. 2.14).



Slika 2.13: Struktura dolgih kosti (Pohl & Nachtigal, 2015).









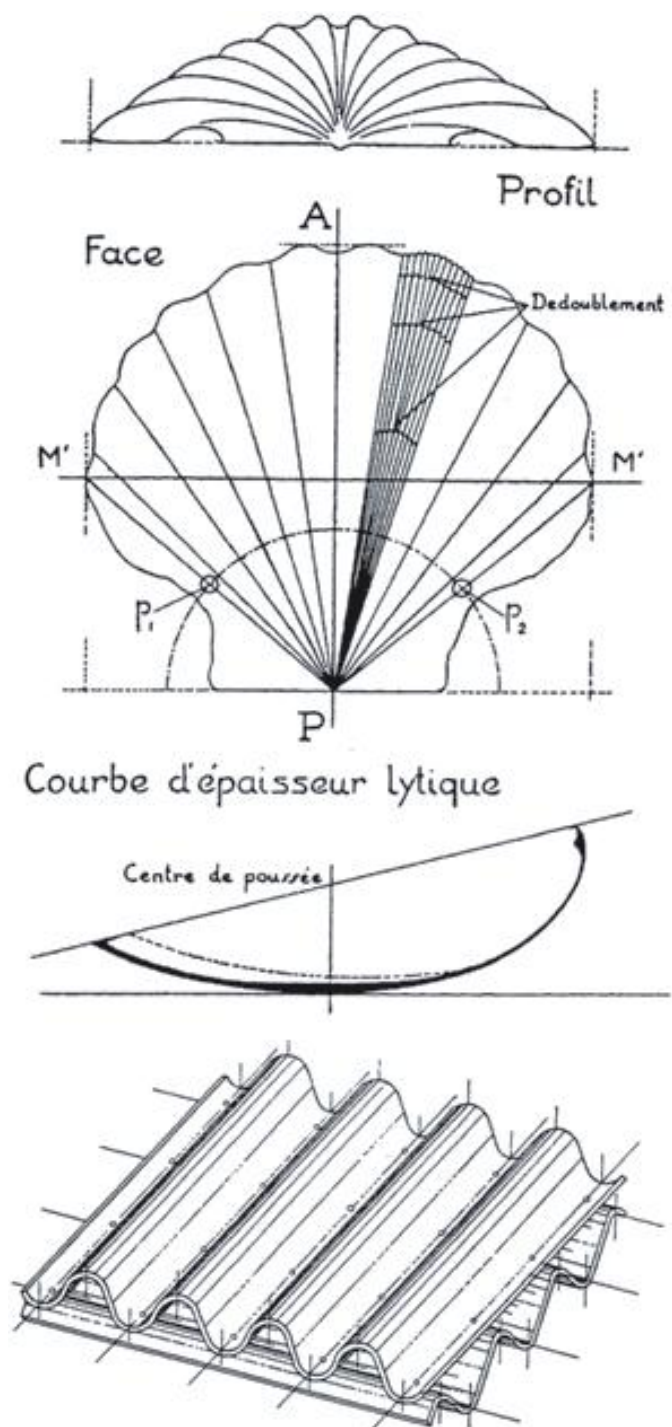
Slika 2.14: **a** volumenski model kosti z ojačitvami; **b** ponazoritev Cullmanovega principa konzole; **c** in **d** shema ojačitev in podpor strešne konstrukcije, Univerza Freiburg; **e** izostatična rebra tovarna Gatti (Pohl & Nachtigal, 2015).

2.5.3 LUPINE ŠKOLJK: Lahke in trdne strukture.

Oblika školjčnih lupin je očitna biološka struktura, na katere principe se stroka že dolgo naslanja. Združuje funkcijo zaščite in nosilne konstrukcije v enem elementu. Odlikujejo jo veliki razponi, kljub tanki debelini stene, kar je mogoče zaradi valovite rebraste površine in specifične geometrije. Kot takšno smo strukturo lahko pričeli prevajati v prakso z razvojem novih materialov, predvsem prednapetega betona in cementov visokih trdnosti.

Tabela 2.1: Primeri zgodnjih lupini podobnih struktur in razmerje med razponom in debelino lupine; a tržnica, Alžirija 1955; b Palazzetto dello sport, Rim 1956; c arena, Kanada 1958; d tovarna, Jena 1923; e jajčna lupina; f Pantheon, Rim 2. stoletje (Pohl & Nachtigal, 2015).

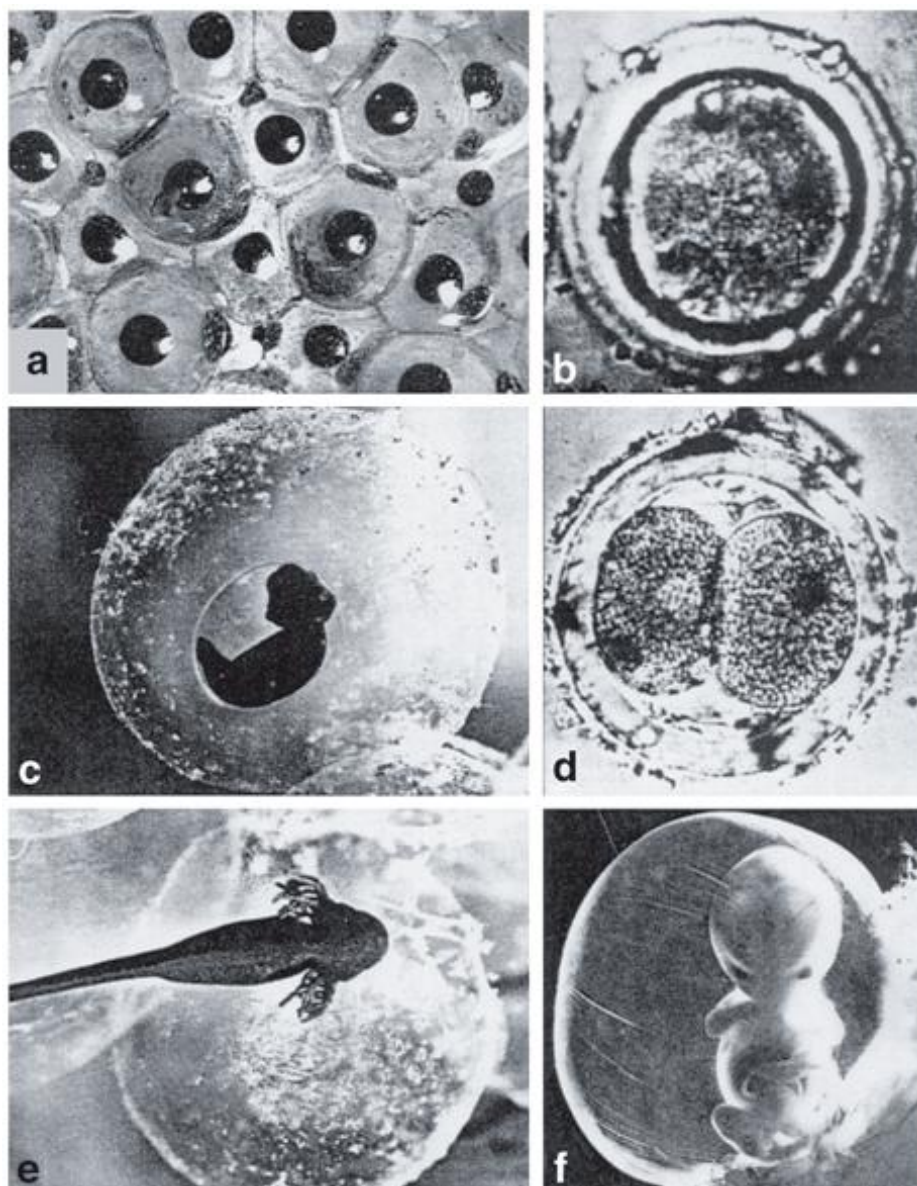
Oblika	Premer	Debelina	$\frac{\text{Debelina}}{\text{Premer}}$
a 	42 m	4 cm	$\frac{1}{1050}$
b 	60 m	2,5 cm	$\frac{1}{2400}$
c 	83,6 m	12,7 cm	$\frac{1}{685}$
d 	40 m	6 cm	$\frac{1}{665}$
e 	0,045 m	0,04 cm	$\frac{1}{112}$
f 	43,6 m	100 cm	$\frac{1}{44}$



Slika 2.13: Študija lupine Velike pokrivače (Pohl & Nachtigal, 2015).

2.5.4 PRINCIP PNEU

Osnovni princip je z membrano ločiti dva plina in z razliko v pritisku ustvariti napetosti v membrani, ki zagotavlja trdnost. Prisotnost v naravi je pogosta, v gradbeni praksi pa pogojena z razvojem tehnoloških membran, kjer je vprašanje razmerja med odpornostjo in težo. Trenutno najbolj razširjena uporaba je za sezonske športne objekte, v naravi pa princip pneu-a najdemo v celičnih membranah in podvodnih bivaliških živali.



Slika 2.14: Primeri principa PNEU v živalskem svetu; **a** žabje ikre; **b** žabja ličinka; **c** izležena žabja ličinka; **d** delitev celic; **e** paglavec; **f** človeški zarodek v fazi razvoja (Pohl & Nachtigal, 2015).

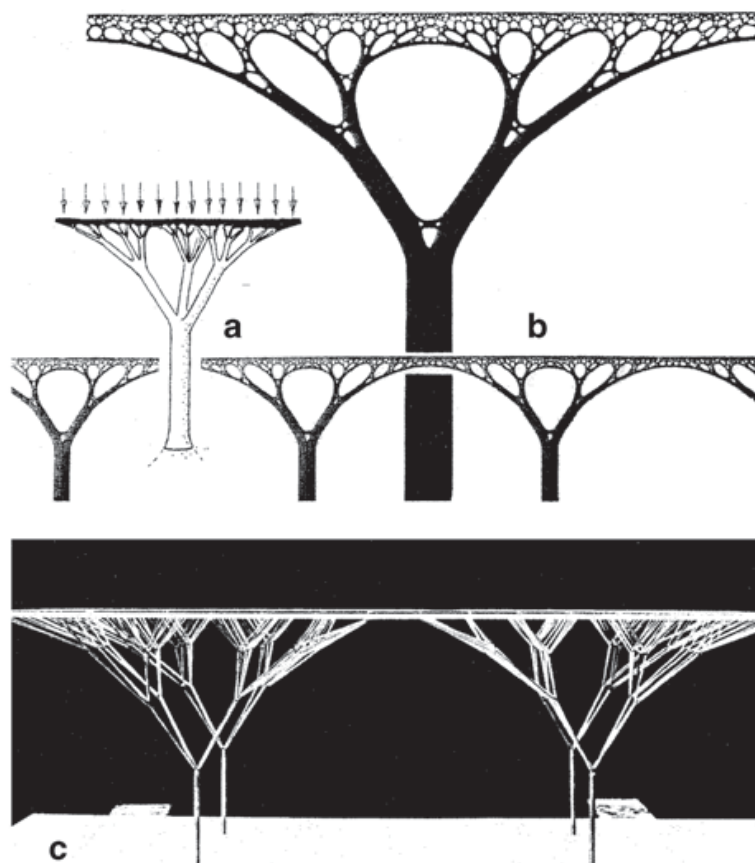
Tensarity princip sodelovanja principa PNEU in natezno obremenjenih elementov. V tem sodelovanju volumen pod pritiskom (PNEU) prevzame tlačne obremenitve, jekleni kabli pa natezne. Tako dobimo nosilno strukturo z zadostno statično višino in nosilnostjo.



Slika 2.15: Smučarski most po tensarity principu z razponom 52 m, Francoske alpe 2005 (Pohl & Nachtigal, 2015).

2.5.5 NADZEMNE DREVESNE STRUKTURE

Ideja je prilagoditi obstoječi koncept stebra s konstantnim prerezom po vzoru drevesnega debla in krošnje. Tako si lahko predstavljamo klasični konstrukcijski sklop stebra in plošče, le da se steber v zgornjem delu razcepi na več tanjših gred, ki podprejo ploščo na več mestih in tako razbremenijo napetosti po domnevnem kritičnem obsegu stebra.



Slika 2.16: Lahki »drevesni stebri« kot integrirana podporna struktura pri izdelavi plošč; **a** zasnova, kjer se prepleta primarna in sekundarna konstrukcija (pošča in steber); **c** računalniški model poenostavljen kot paličje (Pohl & Nachtigal, 2015).

3 KORENINSKI SISTEM

Koreninski sistem (krajše KS) je kot pomemben del rastline skrit pod tlemi. Tako ga večino časa opazovanj narave ne vidimo, razen če se ob sprehodu v gozdu ravno ne spotaknemo ob kakšno korenino. Kakor je razvidno iz nabora že obravnavanih podobnosti med gradbeništvom in naravo v poglavju 5, je koreninski sistem v arhitekturno gradbenem smislu neraziskan. Pri rasti in razvoju je ravno korenina prva struktura, ki poveže in zasidra idejo drevesa. Koreninski sistem opravlja v osnovi štiri funkcije:

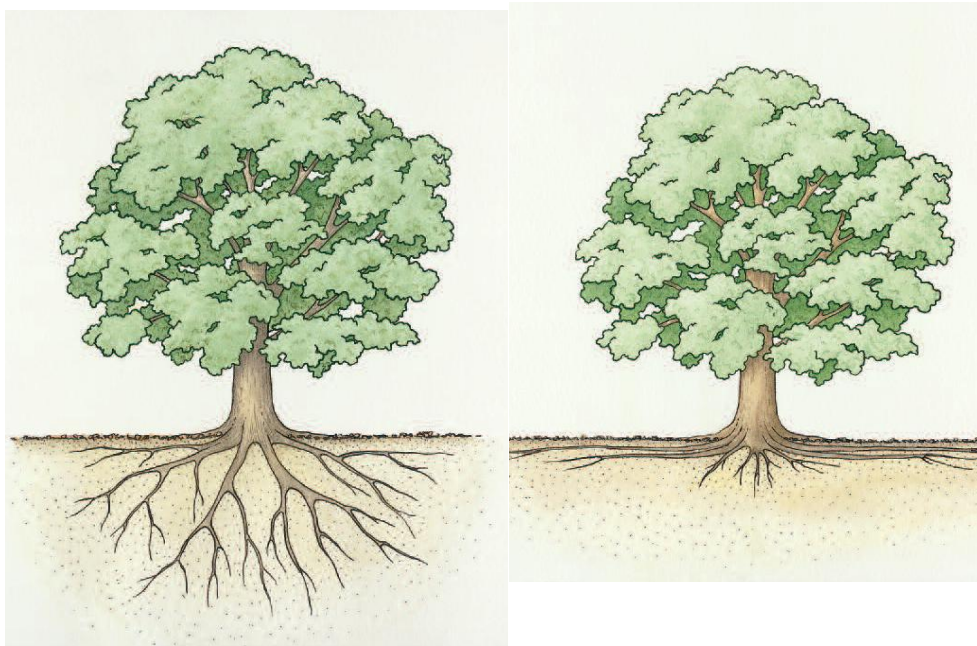
- I. Črpanje vode in anorganskih snovi iz tal.
- II. Sidranje in stabilizacija v zemljini.
- III. Skladiščenje hranil in sinteza hormonov.
- IV. Vegetativno razmnoževanje (razmnoževanje brez tvorbe semen).

Koreninski sistem je kompleksna multifunkcijska struktura, ki združuje biološko in mehansko funkcijo. Takšen princip delovanja nakazuje razvoj tehnologij točno v tem obdobju, ko posamezni gradbeni elementi izvajajo več funkcij (pametne hiše, toplotne črpalke in pasivno hlajenje...).

Pri raziskavah in preučevanju KS se v tem diplomskem delu usmerjamo samo na funkcije KS, ki zadevajo strukturalno stabilnost rastline, in biološko fizikalne procese, ki se v območju KS vršijo in znatno vplivajo na geomehanske lastnosti zemljine.

3.1 OBSEG IN OBLIKE KORENINSKIH SISTEMOV

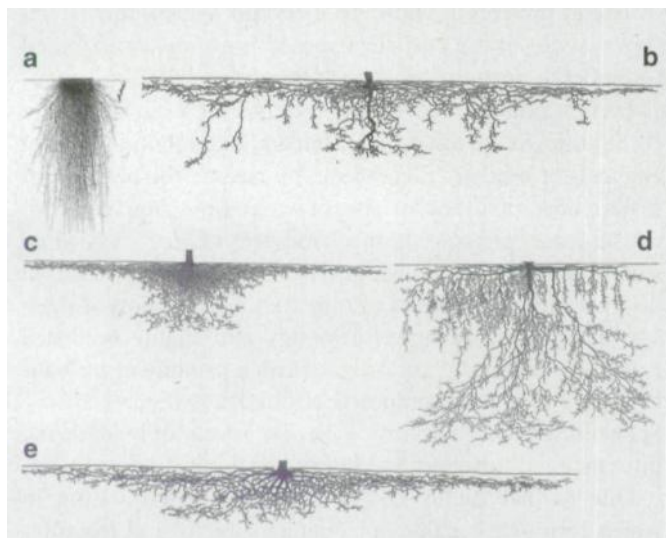
V 80 letih lahko bukev zraste 25 m visoko. Krošnja ima premer 15 m, prostornino 2700 m³, 800.000 listov s skupno površino 1600 m² in zasenči 160 m² tal. Vsako uro porabi 2,3 kg ogljikovega dioksida in 1 kg vode. Proizvede 1,6 kg grozdnega soka in 1,7 kg kisika. Ta kisik zadostuje potrebi za dihanje 10 ljudi. V 80 letih tako predela 40 milijonov m³ zraka. Vsebuje 15 m³ lesa, ki posušen tehta 12 ton (čudežno drevo).



Slika 3.1: Ilustracija drevesa in koreninskega sistema. Levo predstava večine ljudi, desno bolj realna slika (Crow, 2005).

3.1.1 OBSEG

Koreninski sistem predstavlja 20% celotnega drevesa. Sestavljen je iz treh glavnih tipov korenin, pri katerih ima vsaka svojo specifično funkcijo. Dolžina korenin sistema se navadno pri odraslih drevesih meri v stotinah kilometrov. Sicer je natančne podatke težko pridobiti zaradi dejstev, da je KS razpreden v zemljini in, da so manjše korenine krhke ter težko izsledljive in merljive. Tehnike monitoringa se razvijajo, podatki, ki jih lahko pridobimo pa dobivajo na natančnosti in obsegu. Pri predstavi obsega KS je nepoznavalcu lahko v pomoč indeks površine korenin. Določa ga površina KS v stolpcu zemljine pod površinsko enoto na zemeljski površini. Ta znaša od 15 do 28, medtem ko indeks površine listja znaša 12. Iz raziskav je ugotovljeno tudi, da se 99% korenin nahaja v prvem globinskem metru zemljine (Coile, 1937). Pri nekaterih večjih drevesih je bilo ugotovljeno tudi, da je lahko dotična korenina direktno povezana z enim samim setom drevesnih vej. Tako pomeni poškodba ali utesnjenost določene korenine odmiranje oskrbovanih vej (Zimmerman & Brown, 1971).



Slika 3.2: Osnovni tipi koreninskih sistemov; **a** šopasti; **b** korenski; **c** v srčni obliki; **d** KS z močnim korenem in bočnimi koreninami iz katerih se razraščajo korenine globinsko; **e** ploščati sistem (Perry, 1982).

3.1.2 OBLIKA

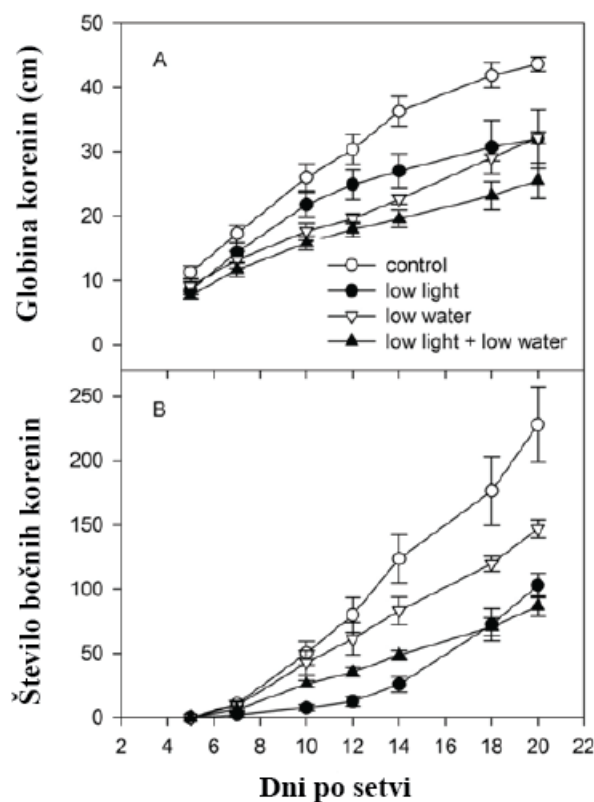
Velikosti korenin KS varirajo in se gibljejo od večjih olesenelih s premeri 30 cm ali več do finih nelesenih premera 0.2 mm. Pri čemer je vsak tim in vsaka velikost pomemben del celotnega KS.

Prva korenina ali koren je korenina, ki se prva razvije iz kalečega semena. Raste vertikalno pod deblom drevesa do globine 2m ali več. Če so pogoji za rast ugodni (prisotnost kisika, ni poškodovana, idr.) je to največja korenina sistema. Njena funkcija je zagotavljanje globinske vode v sušnih razmerah, sidranje in zagotavljanje stabilnosti drevesa, služi pa tudi kot baza za izrast **bočnih korenin**. Bočne korenine so tiste, ki črpajo vodo in hranilne snovi iz zemlje. Delimo jih na primarne, sekundarne in terciarne, pri čemer terciarne, ki so najtanjše, opravljajo največji delež črpanja in tako po hirarhiji naprej. Če se korenika ne razraste, koreninski sistem vzpodbuja rast posebnega tipa bočnih korenin in tako koreninski sistem razvije več enakovrednih olesenelih korenin, navadno od 4 do 11 glavnih, ki izhajajo iz odebeljenega dela debla približno 30cm pod površjem.

Kot zaključni komentar je potrebno poudariti, da je klasifikacija KS na plitkega ali globokega neutemeljena, ker je oblika KS prvotno odvisna od nahajališč hranilnih snovi, vode in prisotnosti kisika v tleh.

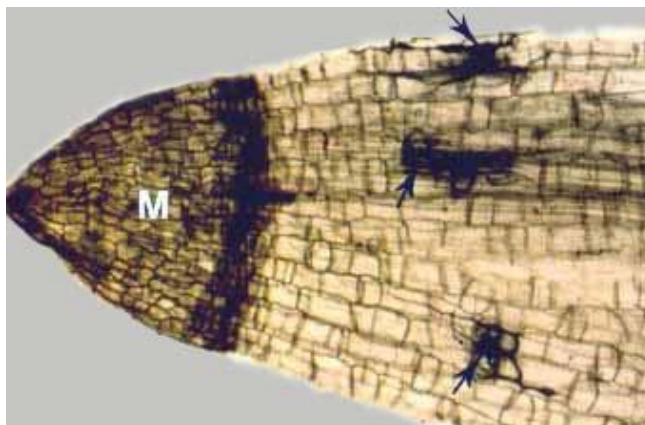
3.2 RAST IN RAZVOJ KORENINSKEGA SISTEMA

Razvoj koreninskega sistema je zavoljo preživetja in rasti drevesa pogojen z dejavniki, omenjenimi v točki 6. Koreninski sistem raste v čelni smeri korenin, kot tudi bočno skozi epidermij. Laično si lahko predstavljamo bočno rast kot nastanek mozolja, kjer se z nabiranjem namenskih celic pod površino ustvari nova bočna korenina. Princip čelne rasti pa je takšen, da se koreninski mešiček odebeli, razširi zemljino in tako ustvari rizosfero in prostor za čelno rast korenine. Nas pri tem raziskovalnem delu najbolj zanima seveda končna (odrasla) oblika koreninskega sistema z svojimi gabariti. Ker so pogoji za rast na vsakem tipu zemljine in v vsakem podnebjju različni, so tudi obsegi KS temu prilagojeni. V gradbeništvu bi bila ta končna oblika za nas merodajna, saj pri dimenzioniranju objekta upoštevamo končno obliko in obtežbo). A pri drevesu je najbolj zanimivo dinamično ravnovesje, kjer je razrast nadzemnega dela rastline pogojena z možnostmi razvoja KS. Kar praktično pomeni, slabši kot so pogoji, manjše je drevo. Tako tudi drevesa nikoli niso čisto simetrična. Rast je postopna in uravnotežena, saj tako ne pride do porušitve oziroma izruva.



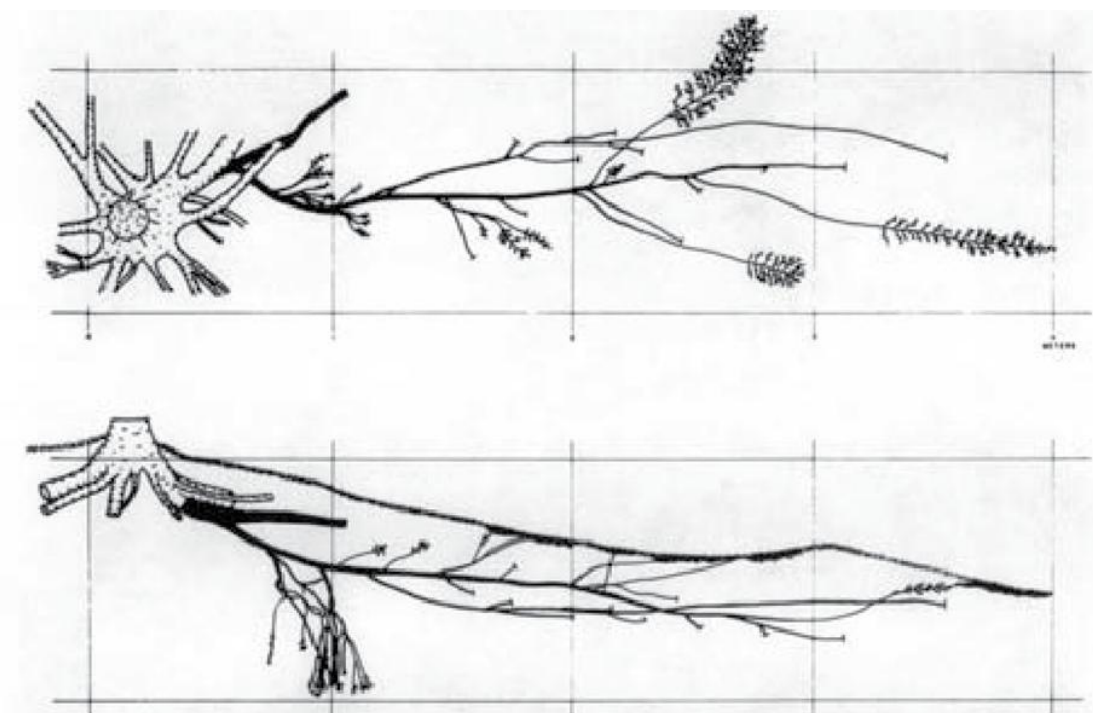
Slika 3.3: Vpliv osvetljenosti in vlage na razrast bočnih korenin in globino koreninskega sistema (Nagel, 2015).

Napredovanje posameznih korenin je zanimivo čisto intuitivno in samosvoje. Pri napredovanju po zemljini, kjer iščejo najboljše pogoje za razrast sekundarnih in terciarnih korenin, ki so specializirane za črpanje, iščejo poti kjer lahko čim lažje napredujejo. Takšne pogoje predstavljajo rahle zemeljske plasti in razpoke. V primeru, da korenina pri rasti naleti na večji, nehomogen element zemljine (kamenje, ipd.), lahko spremenijo smer rasti tudi za 90° in se potem, ko obidejo prepreko, usmerijo nazaj na svojo osnovno trajektorijo, kar nakazuje na inteligenco koreninskega sistema, predvsem koreninskih mešičkov, ki zaznavajo lastnosti zemljine in usmerjajo rast. Kot je domneval Charles Darwin, so koreninski vršički možgani rastline (Trewavas 2007; Barlow 2009).



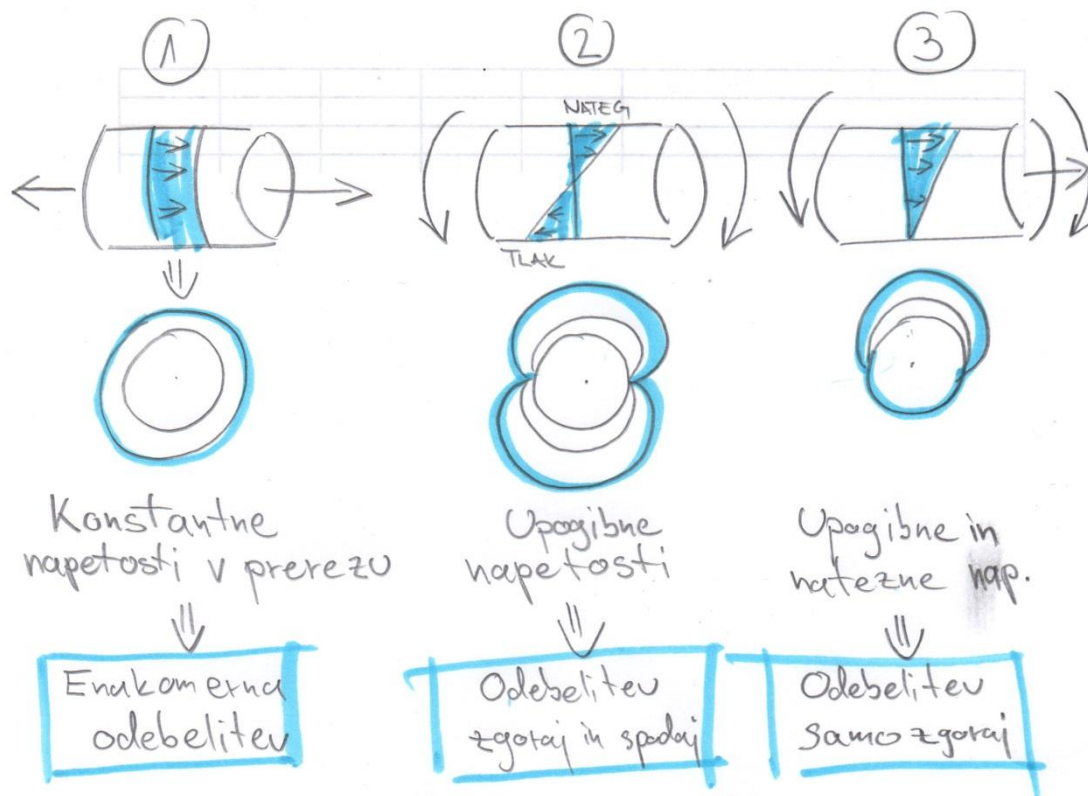
Slika 3.4: Koreninski mešiček (Mycor).

Navadno se ob zadovoljivih pogojih koreninski sistem močno razraste in neprevidnim arhitektom in investitorjem povzroča marsikatero preglavico. Rast KS poteka tudi pozimi kadar je temperatura zemlje nad 5 stopinj. Na primer 40 let star hrast z višino debla 21m in 60cm premera debla lahko kot prosto raslo drevo razraste krošnjo za vsaj dve tretjini premera višine. Pri tem pa KS zajema radij preko 9m več od roba krošnje. Podobno kot pri ledeni gori, je najboljšežnejši in pomembnejši del strukture skrit in zavarovan.



Slika 3.5: Tlorisni pogled in prerez posamezne korenine, ki se razraščča v primarne, sekundarne in terciarne korenine (Perry, 1982).

Omeniti velja še rast koreninskega sistema glede na prevladujoči tip obremenitve posameznih korenin. Spodnja slika prikazuje širjenje oz. rast prereza, kjer je ob enakomerni obremenitvi rast radialna, ob prisotnosti momentov pa povečuje statično višino prereza.



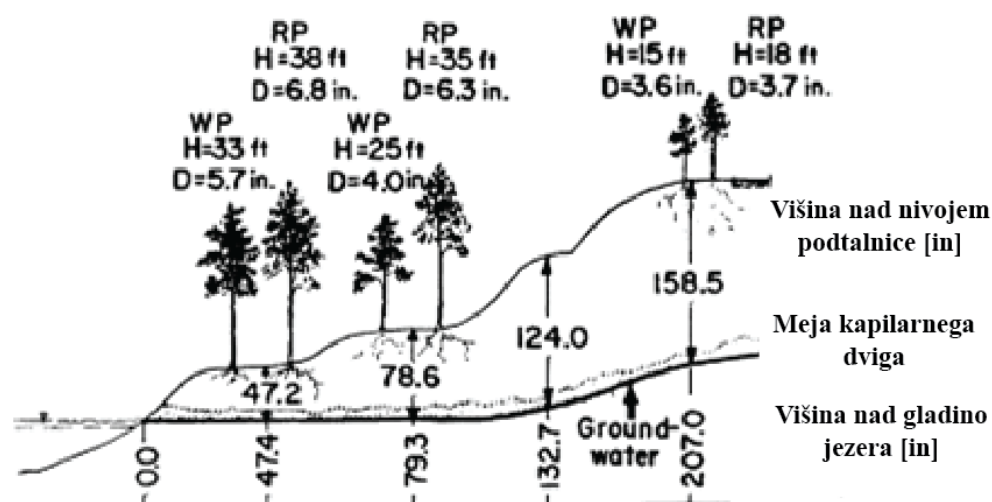
Slika 3.6: Odebelitev korenine glede na periodične obremenitve (Pohh & Nachtigall, 2015).

3.3 GEOMEHANSKA FUNKCIJA

Poleg izrazite biološke funkcije KS vrši procese in ima lastnosti, ki rezultirajo kot ugodni vplivi na zemljino v gradbenem smislu. Poznavanje teh nam lahko pomaga pri načrtovanju geotehničnih objektov in ovrednotenju sodelovanja zemljine in gradbene strukture.

3.3.1 VODA

Nivo vode v zemljini in propustnost tal za padavinske vode je glavni dejavnik pri razvoju KS. Nivo podtalnice direktno vpliva na globino korenin. Kapilarni dvig in prisotnost vode v zemljini sicer približa KS, vendar prevelika globina nivoja zavira rast drevesa, ki vse napore usmerja v globljo razrast korenin.



Slika 3.7: Vpliv talne vode na razrast dreves v 22 let starem nasadu rdečega in belega bora.

H- povprečna višina, D- povprečen premer v višini prsi (Kozlowski, 1981).

Rastlina v gonji po vodi razvije tudi poseben, specializiran tip udarniških korenin (ang. Striker roots), ki hitro vertikalno napredujejo in v sloju, kjer so razmere ugodne, poženejo bočne korenine. Te zagotavljajo trajno oskrbo z vodo tudi v sušnih obdobjih.

Princip črpanja vode je sledeč: drevo ustvari podtlak, ki se od korenin proti listju (vrhu) viša. V listju pri procesu Fotosinteze voda izpareva, pri čemer je hitrost izparevanja je odvisna od atmosferskega tlaka. Vrednost podtlaka je na nivoju podtalnice enaka 0 MPa, v

zemljini $-0,5$ MPa v deblu $-2,5$ MPa in v listih -4 MPa (po Jacobs 2015; Leaf water potentials).

V raziskavi krčenja in nabrekanja brežin železniške proge (K. Briggs; Charing embankment: climate change impacts on embankment hydrology), so po preizkusih na terenu in primerjavi teh z računalniškim modelom prišli do zaključkov, da KS uravnava kapilarni tlak v zemljini in posledično nihanje deleža vode. Takšna rešitev lahko dolgotrajno reši problem zamika tirnic zaradi krčenja in nabrekanja zemljine.

3.3.2 STRIŽNA ODPORNOST ZEMLJINE OB PRISOTNOSTI KS

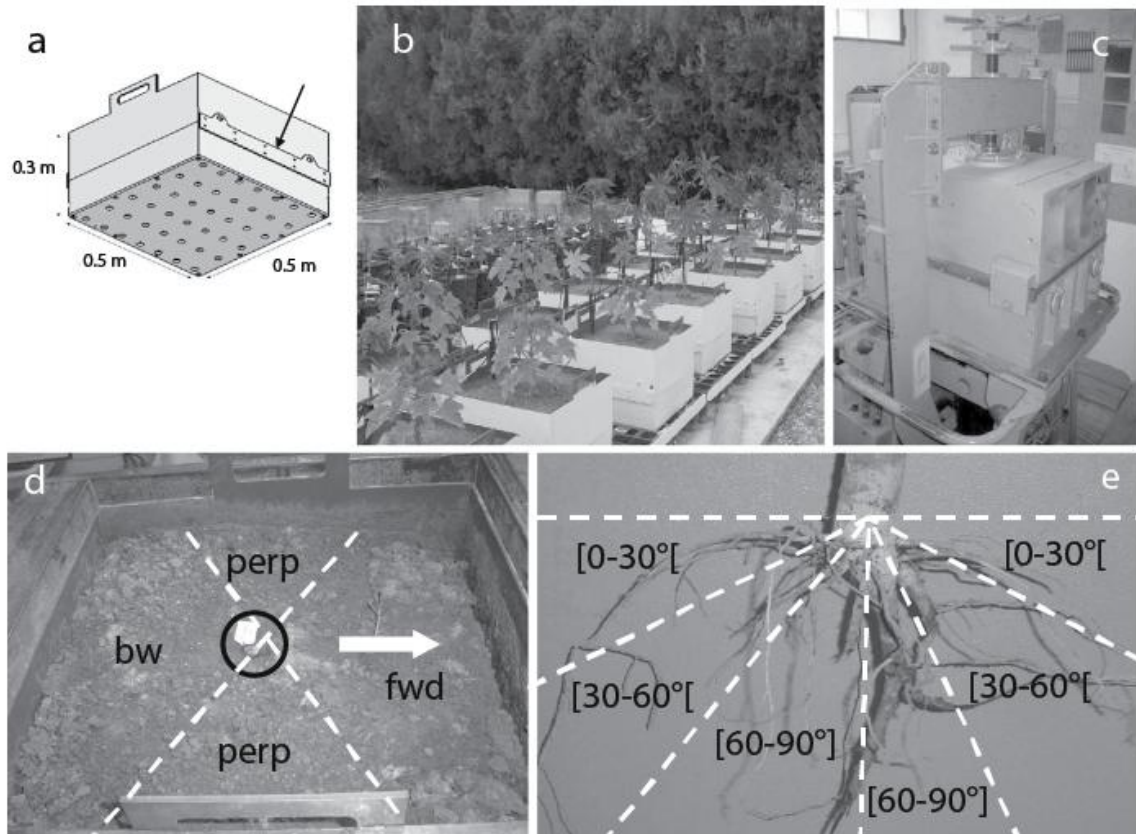
Zemeljski plaz je definiran kot gibanje zemljine pod vplivom gravitacije, ki mu kot splošnemu in neizogibnemu pogoju sledi sekundarni, ne nujno prisotni hidrološki. Prisotnost vode v zemljini znatno zmanjša strižno odpornost zemljine. Jasno je, da koreninski sistem poveča strižno trdnost in predstavlja konkurenčno alternativo. Pri ugotavljanju lastnosti nas predvsem zanima arhitektura korenin in gostota razraščeniosti. Po raziskavi Pollen-Blankhead (2010) so korenine, ki se razraščajo po klančini navzdol, bolj nosilne ob poružitvi kot tiste, ki rastejo po klančini navzgor. Bolj funkcionalni so tudi KS z vertikalnim razvojem korenin (tu igra glavno vlogo korenika) in velikim številom manjših korenin, ki zapolnijo čim večji volumen zemljine prečno na ravnino poružitve. Ugotovljeno je, da globlje korenine nastala sila izpuli iz zemljine, medtem ko se korenine tik pod površjem pretrgajo (Mickovski, et al. 2008).

Po pregledu že opravljenih raziskav se porajajo pomembna vprašanja glede parametrov in lastnosti, ki določajo lastnosti zemljine pred in po strižni poružitvi. Kakšni KS so najbolj primerni, katere lastnosti KS najbolj vplivajo na maksimalno silo poružitve, katere izboljšajo elastični modul zemljine? Ali spreminjajo fizikalne lastnosti zemljine? (kohezivnost, notranji kot trenja). Po raziskavi (Ghestem, Sidle & Stokes, 2011) imajo mehanizmi, ki vplivajo na stabilnost pobočji pozitivne in negativne vplive (Tabela 3.1).

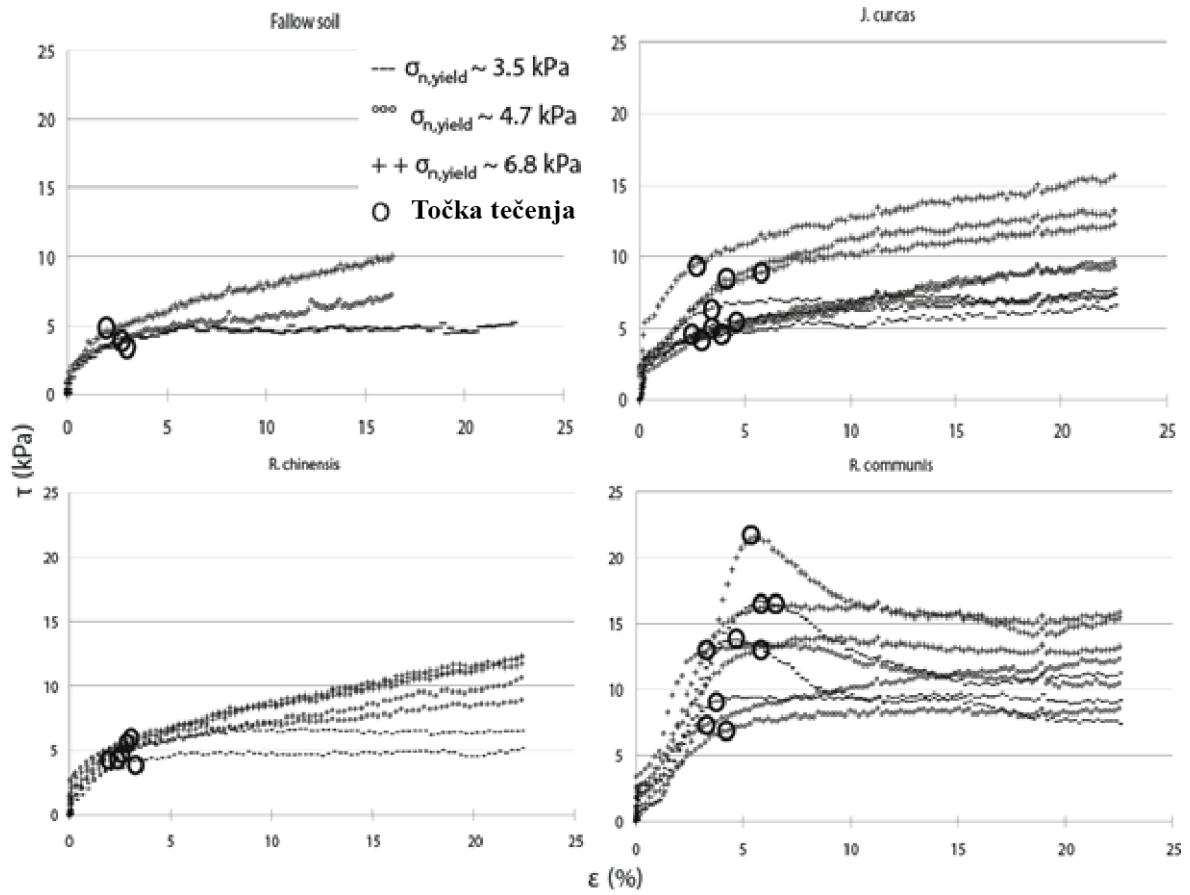
Tabela 3.1: *A* negativen vpliv, *B* pozitiven vpliv, *m* marginalen v. (Ghestem, Sidle & Stokes, 2011).

Mehanizmi, ki vplivajo na stabilnost	Tip plazju na katerega vpliva mehanizem	
	Plitki, hipni plazovi	Globoki plazovi
HIDROLOŠKI		
Prestrežen dež na krošnjah	mB	mB
Organska podlaga, ki poveča razgibanost tal	mA (B za odtok)	mA
Korenine kot glavne smeri tokov	B ali A	B ali A
Korenine črpajo vodo iz zemljine	B ali mA	B ali mA
MEHANSKI		
Korenine kot armaturna vlakna v zemeljski matriki	B	B
Močne korenine, ki prebadajo zemeljske sloje v stabilnejšo podlago	B	mB
Teža dreves poveča rezultanto sil v smeri pobočja	mB ali mA	mB ali mA
Veter prenaša dinamične obtežbe na zemeljski plašč	mA	mA

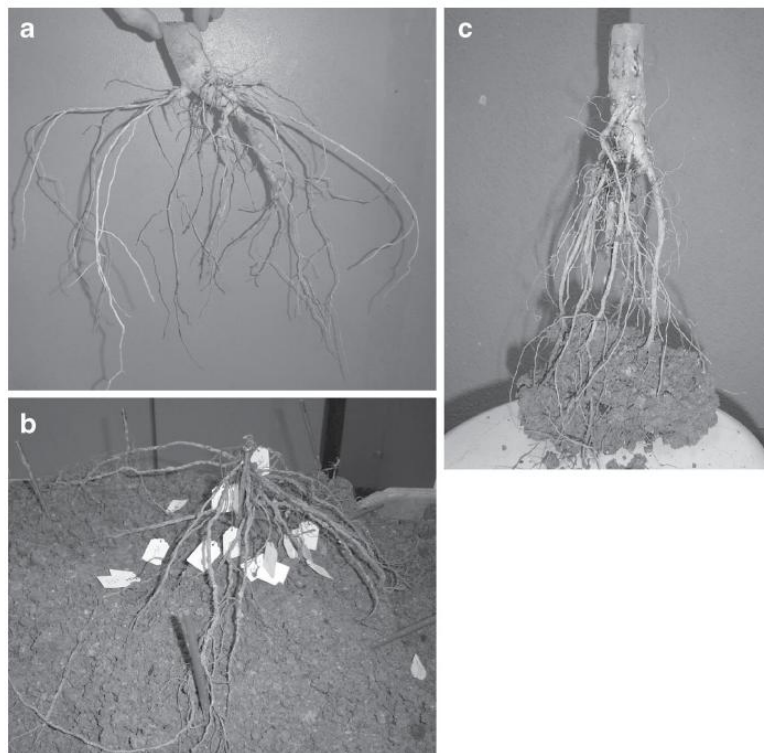
Cilj raziskave (Ghestem et al. 2014) je bil mehanski vpliv KS treh različnih drevesnih sort, ki se naravno razraščajo na pobočjih Kitajske. Direktni strižni testi so bili opravljeni na 10 mesecev starih rastlinah, ki tvorijo v osnovi 3 različne tipe KS.



Slika 3.8: Posamezni koraki raziskave; **a** testni zaboj iz dveh delov, **b** rastlinje posajene v zabojih, **c** naprava Casagrande za izmero direktnega striga, **d** štiri sektorji zemljine za določitev smeri rasti glede na strižno silo (puščica), **e** sektorji določitve kota razrasti korenin (Ghestem et al. 2014).



Slika 3.9: Rezultati strižnih testov (Ghestem et al. 2014).



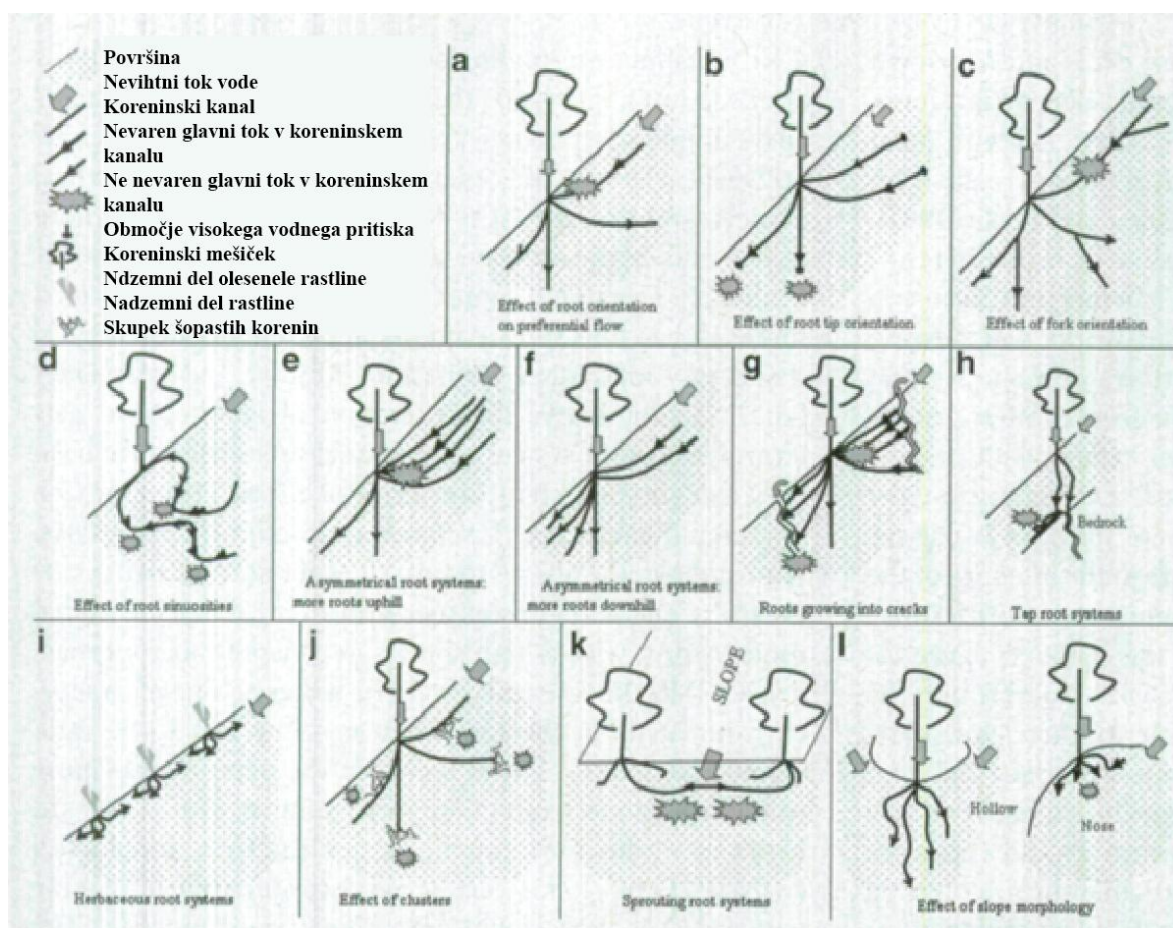
Slika 3.10: Različni tipi koreninskih sistemov testnih rastlin, **a** *J. curcas*, **b** *R. chinensis*, **c** *R. communis* (Ghestem et al. 2014).

Ugotovitve:

- Pri strigu je KS znatno doprinesel k odpornosti in potrebni deformacijski energiji, vendar pa ni znatno vplival na elastičnost zemljine preostale obremenitve. Ta bi bila bolj odvisna od stisnjenosti in deleža vlage v zemljini.
- *R. communis* je zaradi korenike in vertikalnega razvoja (vertikalne korenine se obnašajo kot ročica pri strižni obremenitvi), razvil je tudi veliko finih korenin **c**, *J. curcas* z več koreninami v kotih 90° - 30° na drugem mestu **a** in nazadnje *R. chinensis* **b**.
- Korenine vplivajo na odpornost ne samo če so v ravnini porušitve, ampak tudi ko so nad ali pred njo.
- Smer rasti korenin se pri računanju oz. ocenjevanju strižne odpornosti mora upoštevati, kot tudi različne kombinacije finih in večjih korenin.

VPLIV KORENINSKEGA SISTEMA NA STABILNOST ZEMLJINE SHEMATSKO

Na podlagi raziskave (Ghestem, Sidle & Stokes, 2011) so nekateri od možnih scenarijev vpliva na stabilnost zemljin sledeči (Slika 3.11); **a** orientacija s pobočjem je bolj učinkovita za odvodnjavanje, **b** koreninski kanali lahko predstavljajo končne točke za vodni tok, **c** razvejanost korenin lahko deli ali koncentrira vodni tok, **d** korenine v obliki sinusoid (krivin) uravnavajo vodna nihanja odvisno od njihove orientacije, **e** če večina korenin raste navzgor, je možnost povečanja kapilarnega dviga, **f** ob rasti navzdol je izboljšano in usmerjeno odvodnjavanje, **g** razrast korenin proti razpoki lahko poveča pospešek vodnega toka, **h** korenski sistem odvodnjava v globlje sloje, kjer voda lahko odteče ali stoji, **i** šopasti korenski sistem razporedi vodo v zgornjih slojih, **j** skupki korenin so kot spužve in ustvarjajo območja z visokim vodnim tlakom, **k** razrast korenin pravokotno na gradient lovi vodo, **l** topografske značilnosti lahko kombinirajo več različnih tokov vode in vzorcev razporeditve korenin.

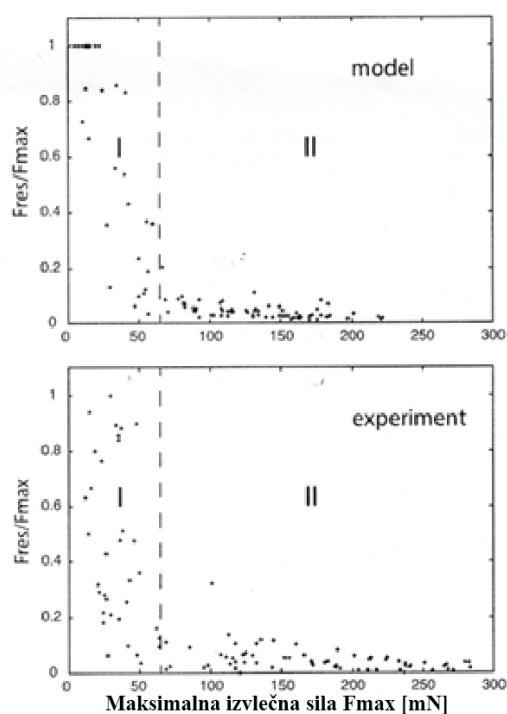


Slika 3.11: (Ghestem, Sidle & Stokes, 2011).

Sklepčno nudi kombinacija le teh vplivov ob drugih nedokazanih pozitivnih vplivih višjo odpornost zemljine na strig in je splošno pomembna za omejitev gibanja zemeljskih mas in razumevanja vpliva koreninskega sistema.

3.3.3 OPORNOST KORENINSKEGA SISTEMA NA IZVLEK

Raziskava (Crouzy, Edmaier, Perona; Biomechanics of plant anchorage at early development stage 2015), je na osnovi testov izvleka pri sadikah ovesa zastavila glede na kompleksnost parametrov enostaven model izračuna maksimalne izvlečne sile in porušitvene sile (sl. 3.12). Ta model zaradi lažjega izračuna obravnava linearen odziv stika med zemljino in korenino. Čeprav je raziskava orientirana agronomsko, kjer motiv izvira iz želje ugotoviti kakšno odpornost dosežejo sadike v primeru poplave, nam vseeno daje vpogled v razvoj sile glede na velikost in dolžino korenin. Zanimivo je, da se starejše sadike obnašajo bolj plastično po dosegu maksimalne izvlečne sile in si s časom opomorejo. Raziskovali so KS s tremi koreninami, pri katerih je glavna korenika predstavljala 60% celotne dolžine. Tako je nasprotujoča sila sili izvleka odvisna od: dolžine korenin in koreninskih vlaken, elastičnosti odziva in trenja med korenino in zemljino. Pomembno pa je omeniti, da če je trenje med zemljino in korenino večje kot odpornost na strig, povzamemo maksimalne dovoljene napetosti pri strigu. Na grafu je razvidno, da pri višji izvlečni sili F_{max} sledi hipen izvlek (cona II), pri manjši je pa odpor, oz. preostala sila F_{res} primerljiva F_{max} .



Slika 3.12: Primerjava izsledkov dobljenih po računski in empirični metodi (Crouzy, 2014).

3.3.4 RAZISKAVA NATEZNE TRDNOSTI KORENIN

Kot smo že omenili, gozdna vegetacija izboljša stabilnost pobočij, izboljša strižno odpornost in uravnava vodne tokove v zemljini. Ta raziskava se je omejila na mehanske lastnosti korenin. Prepoznali so dva mehanizma so-vpliva korenin in zemljine. Majhne fleksibilne korenine mobilizirajo svojo natezno trdnost ob obremenitvi ustvarjeni s trenjem med zemljino in korenino. Tako izboljšajo strižne lastnosti matrike oz. volumna zemljine (podobno mikro armiranju betonskih konstrukcij). Korenine večjega premera pa v osnovi izvajajo funkcijo sidranja, saj predirajo različne ne kohezivne sloje tal in načeloma pod obremenitvijo zdrsnejo brez porušitve.

Obravnavani model kohezije korenin (Battista et. al, 2005):

$$C_r = K \cdot t_R, \quad (1)$$

kjer je t_R faktor natezne trdnosti korenin na enoto zemljine; K je faktor, ki upošteva naključno usmerjenost korenin v obziru na ravnino porušitve, v večini primerov se giblje od 1.0 do 1.3.

$$t_R = T_r a_r, \quad (2)$$

kjer je T_r povprečna natezna trdnost na povprečen prerez zemljine Koreninskega sistema; a_r je indeks razmerja RAR (Root area ratio; površina korenin na površino zemljine), ki se izračuna iz razmerja A_r/A , kjer je A_r skupna površina korenin v prerezu zemljine in A celotna površina prereza zemljine.

Na natezno trdnost korenine vpliva tako vrsta drevesa kot tudi njena velikost (premer). Splošno privzeta oblika razmerja med natezno trdnostjo $T_r(d)$ in premerom d je sledeča enačba (Battista et. al, 2005):

$$T_r(d) = \alpha d^{-\beta}, \quad (3)$$

kjer sta α in β empirične konstante odvisne od vrste drevesa. Tako ob upoštevanju variacije velikosti korenin, enačbo zapišemo drugače kot:

$$t_R = \sum_{i=1}^N T_{ri} \frac{A_{ri}}{A}, \quad (4)$$

kjer i ponazarja razred glede na premer korenine in N število razredov.

Na podlagi predstavljenega modela (Battista et. al, 2005), je obseg izboljšave zemljine odvisen od natezne trdnosti korenin, gostote in globine korenin, do vrste, okolja in njegovih dejavnikov (gostota zasaditve, požar, erozija, itn.). Tako prostorska razporeditev korenin zelo varira pri posameznih primerih in dostikrat so za obsežnejše razumevanje potrebna dodatna empirična raziskovanja.

Sledeči testi so bili opravljeni na izkopanih koreninah, ki so bile hranjene pod tremi različnimi pogoji. Testi so bili izvedeni na osmih različnih drevesnih sortah v Lombardiji na severu Italije. Preizkušene korenine so imele premer do 5mm, debele korenine veliko pripomorejo k površini korenin v zemeljskem prerezu, vendar ne delujejo v skladu z enačbo 1 in prejšnjimi navedki, čeprav so pomembni za sidranje, ne dosežejo mejne natezne obremenitve.

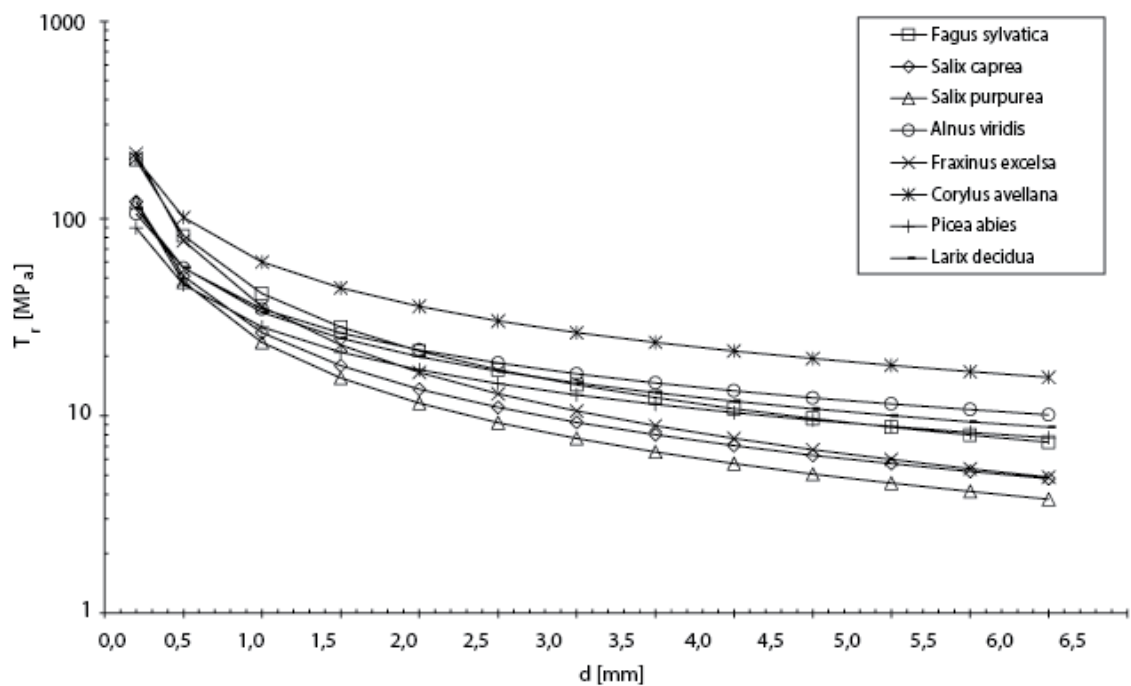
Tabela 3.3: Izmerjeni parametri odnosa odpornosti in premera korenin (Battista et al. 2005).

Species	a	b	r ²	number of valid tests
Fagus sylvatica	41.65	0.97	0.62	168
Salix purpurea	26.33	0.95	0.55	150
Salix caprea	34.50	1.02	0.82	144
Fraxinus excelsa	35.73	1.11	0.51	17
Alnus viridis	34.76	0.69	0.34	49
Corylus avellana	60.15	0.75	0.57	13
Picea abies	28.10	0.72	0.53	92
Larix decidua	33.45	0.75	0.47	43

Species	Diameter (mm)				Strength (M pa)			
	Mean	SD	Max	Min	Mean	SD	Max	Min
Fagus sylvatica	1.33	0.93	4.59	0.14	57.47	81.61	730.97	2.27
Salix purpurea	1.28	0.82	4.10	0.18	51.47	35.81	522.03	2.07
Salix caprea	1.42	1.10	5.70	0.13	47.80	60.14	408.59	6.02
Fraxinus excelsa	1.95	1.15	5.70	0.27	36.86	68.05	296.51	4.92
Alnus viridis	2.03	1.02	5.91	0.65	20.42	14.77	92.13	3.35
Corylus avellana	1.65	1.15	3.82	0.31	67.87	66.25	256.76	11.89
Picea abies	1.78	1.19	5.84	0.12	38.94	83.79	649.71	5.79
Larix decidua	1.68	1.49	5.47	0.14	66.14	99.78	427.96	6.44

Ugotovitve:

- V večini primerov se RAR indeks giblje med 0.1% in 0.35%, odvisno od vrste in dosega odstopanja za 1/3 v različnih presekih istega KS.
- Okolje ne vpliva bistveno na natezno trdnost korenin.
- Najbolj odporna sorta, zajeta v raziskavi, je *Corylus avellana* (lešnik).
- Pri določitvi RAR moramo upoštevati veliko spremenljivk (sorta, lokacija, globina, genetika, podnebje in upravljanje z gozdom).
- Faktor RAR se manjša z globino in zmanjšanjem ugodnih vplivov za razrast korenin (hranila, voda, zbitost zemljine).



Slika 3.13: Natezna trdnost v odnosu do premera različnih vrst dreves (Battista et al. 2005).

3.4 TRENUTNA UPORABA KS IN DREVES V GRADBENIŠTVU IN ARHITEKTURI

3.4.1 DREVESNE HIŠE

Po vzoru ptičjih gnezd in zadostitvi potrebe po varnosti ljudje že tisočletja gradimo bivališča, ki so odmaknjena od tal (mostiščarji, plemena v Afriki, itd.). Če nam okolje ponudi dovolj veliko drevo, ki ga ocenimo kot primeren gradbeni element (nosilni steber), je logična odločitev uporaba le tega. Drevesne hiše so lahko podprte samo na debla dreves, vendar navadno zaradi večje stabilnosti dodamo še druge podporne elemente, ki so pritrjeni na tla. Je pa zelo pomembno, da pri pritrjevanju nosilne konstrukcije v kar najmanjši možni meri vplivamo na rast in zdravje drevesa, saj smo od njega odvisni.



Slika 3.14: Drevesna hiša v Celjskem mestnem gozdu (Mestni gozd, 2016).

3.4.2 IZRAŠČENO POHIŠTVO – FULLGROWN

Princip je genialen, postopek pa dolgotrajen. Mlado sadiko drevesa skozi cikel njegove rasti usmerjamo po zastavljenih kalupih in tako čez nekaj let dobimo končno želeno formo.



Slika 3.15: Primer izraščenega pohištva (Fullgrown, 2016).

4 GEOTEHNIČNI OBJEKTI – SPINNANKER (temeljno sidro)

Sistem Spinnanker je specifičen geotehnični element, ki prevzema tlačne in tenzijske obremenitve. Sestavljen je iz sidrne plošče in navojnih palic. Gre za montažno obliko temeljenja ali sidranja, ki ne zahteva betonskih del in lahko takoj po vzpostavitvi prenese 100% obremenitev. Predstavlja odlično analogijo koreninskega sistema v gradbeništvu in seveda je tudi ta sistem, kot vsaka druga dobra ideja, patentiran.

ZASNOVA

Podjetje Drott Holding GmbH proizvaja dva tipa sider in sicer manjše s 6 palicami in večje z 12 palicami. Sestavljen je iz glavne sidrne plošče premera 350 mm (tip XII – 12 palic), v katero so vijane posebne armaturne palice pod kotom 30° do 45° od normale na teren v razvejanem vzorcu (sl. 4.1). Palice so tipske dolžin od 2 m do 4 m, seveda pa je mogoče vgraditi tudi prilagojene dimenzije.



Slika 4.1: Slika sistema Spinnanker (Okonek, 2016).

PODROČJA UPORABE

Zaradi svoje lahke zasnove je področje uporabe takšnega sistema zelo širok. Možna je uporaba na odročnih, težko dostopnih lokacijah (gorski svet, smučišča, gozd,...) pri izgradnji temeljev za gozdne opazovalnice, gorske ute in bivake. Služi kot sidro za napenjalne kable gozdnih žičnic, teptalcev in daljnovodnih stolpov. Nemalokrat pa prenaša tako tlačne kot natezne obremenitve (proti-plazne zaščite, varovalne ograje, antene, vetrnice, oddajniki). Sistem je mogoče po reverzibilnem postopku montaže tudi demontirati, kjer po demontaži ostanejo praktično neopazne izvrtine armaturnih palic, tako se veliko uporablja tudi za začasne objekte.



Slika 4.2: Uporaba kot sidrni element pod samo natezno obremenitvijo (Okonek, 2016).



Slika 4.3: Uporaba kot temeljno sidro, natezno in tlačno obremenjen element (Okonek, 2016).

TEREN IN TIPI TAL

Glede na način vgradnje (uvrtavanje brez izkopa) naklon terena ne vpliva na izvedbo sidrišča. Sidrne palice lahko vijačimo v vse tipe tal, razen v živo skalno podlago. Glede na tip obremenitve dosega sistem dobre trdnosti tako v rahlih peščenih ali prodnatih tleh kot tudi v glinah in meljih.

VGRADNJA

Najprej se sidrna plošča pozicionira in z začasnim centričnim vijakom pritrdi na podlago in tako pri vijačenju sidrnih palic ne premikamo njenega položaja. Nakar glede na tip izbrano število palic preko posebnega nastavka in reduktorja privijačimo v zemljino. Ko vse palice uvrtamo, začasni vijak odstranimo pritrdimo distančnik in montažno ploščo in temeljno sidrišče je pripravljeno. Celoten postopek traja približno eno uro za posamezen sistem.



Slika 4.4: Montaža temeljnih sider (Okonek, 2016).



Slika 4.5: Izgrajen objekt na sidrih (Okonek, 2016).



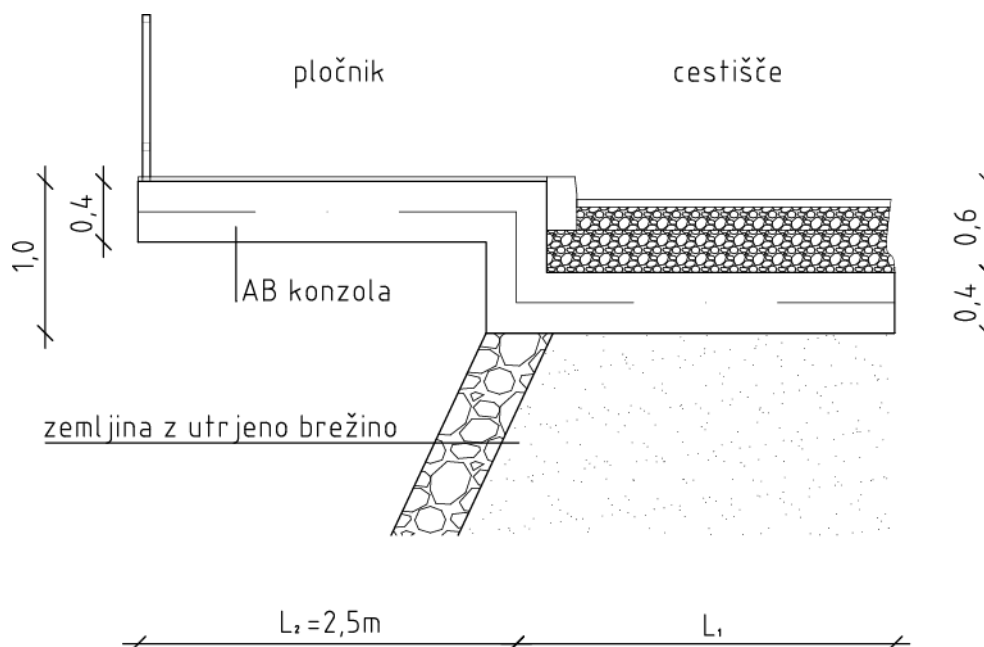
Slika 4.6: Detalj stika objekta in sider (Okonek, 2016).

5 IZRAČUN PRAKTIČNEGA PRIMERA UPORABE SISTEMA SPINNANKOR

5.1 TEHNIČNI OPIS

Pri projektiranju ceste smo pri umestitvi pločnika naleteli na omejitev s prostorom. Tako je bilo potrebno izvesti pločnik na konzolnem AB nosilcu. Z uporabo sistema temeljnih sider lahko znatno zmanjšamo velikost temeljnega dela konzole in posledično zmanjšamo vgrajeno količino betona.

5.2 GEOMETRIJSKA ZASNOVA



Slika 5.1: Geometrijska zasnova računskega primera.

5.3 IZRAČUN

Pri projektiranju uporabimo Projektni pristop 3 pa EC7.

PARCIALNI FAKTORJI

$$\gamma_g = 1,35$$

$$\gamma_q = 1,5$$

$$\gamma_{g, fav} = 1$$

$$\gamma_{q, fav} = 0$$

MATERIAL

$$\gamma_\varphi = 1,25$$

$$\gamma_c = 1,25$$

$$\varphi = 34^\circ$$

$$k_0 = 1 - \sin \varphi_m = 1 - \sin 30,91^\circ = 0,5$$

$$\tan \varphi_m = \frac{\tan \varphi}{\gamma_\varphi} = \frac{\tan 34^\circ}{1,25} \Rightarrow \varphi_m = \arctan \frac{\tan 34^\circ}{1,25} = 30,91^\circ$$

$$\gamma_{Rv} = 1$$

$$\gamma_{Rh} = 1$$

$$\gamma_a = 1$$

MATERIALNE LASTNOSTI

$$\gamma_b = 25 \text{ kN/m}^3 \quad \text{vključuje asfalt}$$

$$\gamma_z = 20 \text{ kN/m}^3$$

$$c = 0$$

$$\varphi = 34^\circ$$

OBTEŽBE

Lastna teža temelja

$$q_{G1} = \gamma_b \cdot d_b + \gamma_z \cdot d_{nos} = 25 \cdot 0,4 + 20 \cdot 0,6 = 22 \text{ kN/m}'$$

$$q_{G1,k} = \gamma_{g, fav} \cdot q_{G1} = 1 \cdot 22 \text{ kN/m}' = 22 \text{ kN/m}'$$

$$q_{G2} = \gamma_b \cdot d_b = 25 \cdot 0,4 = 10 \text{ kN/m}'$$

$$q_{G2,k} = \gamma_g \cdot q_{G2} = 1,35 \cdot 10 = 13,5 \text{ kN/m}'$$

Koristna obtežba

$$q_{Q2} = 10 \text{ kN/m}'$$

$$q_{Q2,k} = q_{Q2} \cdot \gamma_q = 10 \cdot 1,5 = 15 \text{ kN/m}'$$

Horizontalna obtežba

$$q_H = \gamma_Z \cdot h = 20 \cdot 1,0 \cdot k_0 = 20 \cdot 1,0 \cdot 0,5 = 10 \text{ kN/m}'$$

$$q_{H,k} = q_H \cdot \gamma_g = 10 \cdot 1,35 = 13,5 \text{ kN/m}'$$

$$p = 16,67 \text{ kN/m}'$$

$$p_H = p \cdot k_0 = 16,67 \cdot 0,5 = 8,34 \text{ kN/m}'$$

$$p_{H,k} = p_H \cdot \gamma_g = 8,34 \cdot 1,5 = 12,51 \text{ kN/m}'$$

DOLOČITEV REZULTANT

Za izpeljavo določimo faktor f , ki je določen kot razmerje $f = \frac{L_1}{L_2}$. Pri čemer je $L_2 = 2,5 \text{ m}$ konstanta.

$$G_{1,k} = q_{1,k} \cdot L_1 = q_{1,k} \cdot f \cdot L_2 = 22 \cdot f \cdot 2,5 = 55f \text{ kN}$$

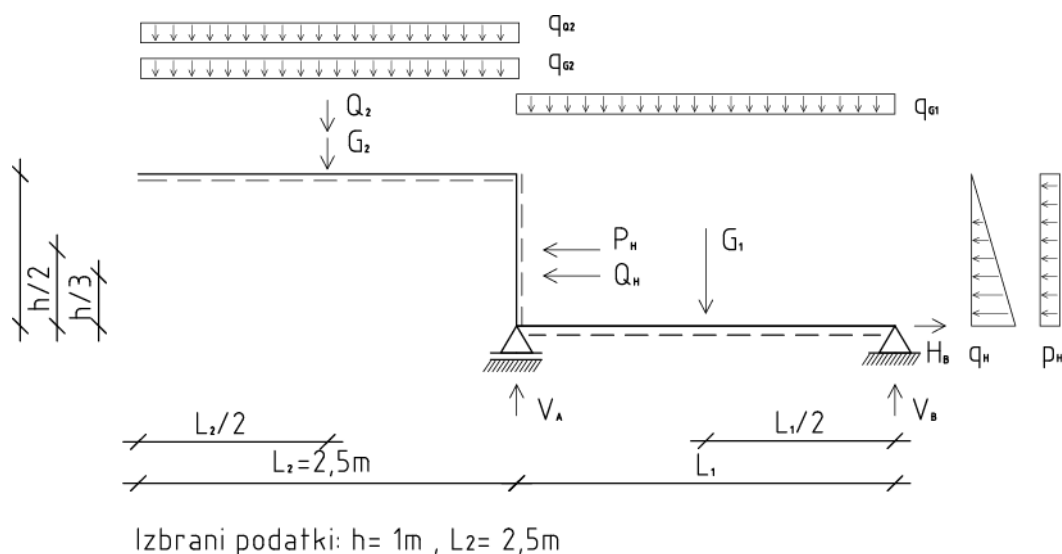
$$G_{2,k} = q_{2,k} \cdot L_2 = 13,5 \cdot 2,5 = 33,75 \text{ kN}$$

$$Q_{2,k} = q_{2,k} \cdot L_2 = 15 \cdot 2,5 = 37,5 \text{ kN}$$

$$Q_H = q_H \cdot \frac{h}{2} = 13,5 \cdot \frac{1}{2} = 6,75 \text{ kN}$$

$$P_H = p_{H,k} \cdot h = 12,51 \cdot 1 = 12,51 \text{ kN}$$

STATIČNI SISTEM



Slika 5.2: Statični sistem računskega primera.

RAVNOTEŽNE ENAČBE

Vsota momentov v podpori A:

$$\sum M_A = 0:$$

$$G_2 \cdot \frac{L_2}{2} + Q_2 \cdot \frac{L_2}{2} + P_H \cdot \frac{h}{2} + Q_H \cdot \frac{h}{3} - G_1 \cdot f \cdot \frac{L_2}{2} + V_B f L_2 = 0$$

$$33,75 \cdot \frac{2,5}{2} + 37,5 \cdot \frac{2,5}{2} + 12,51 \cdot \frac{1}{2} + 6,75 \cdot \frac{1}{3} - 55f \cdot f \cdot \frac{2,5}{2} + V_B f 2,5 = 0$$

$$42,1875 + 46,875 + 6,25 + 2,25 - 68,75f^2 + 2,5V_B f = 0$$

$$-68,75f^2 + 2,5V_B f + 97,5625 = 0$$

$$V_B = \frac{1}{2,5f} \cdot (68,75f^2 - 97,5625)$$

Vsota vertikalnih sil:

$$\sum V = 0:$$

$$V_A + V_B = G_1 + G_2 + Q_2$$

$$V_A = G_1 + G_2 + Q_2 - V_B$$

$$V_A = 55f + 33,75 + 37,5 - V_B$$

$$V_A = 55f - V_B + 71,25$$

Vsota horizontalnih sil (upoštevajoč trenje):

$$\sum H_B = 0:$$

$$H_B = P_H + Q_H - G_1 \cdot \tan \varphi_m$$

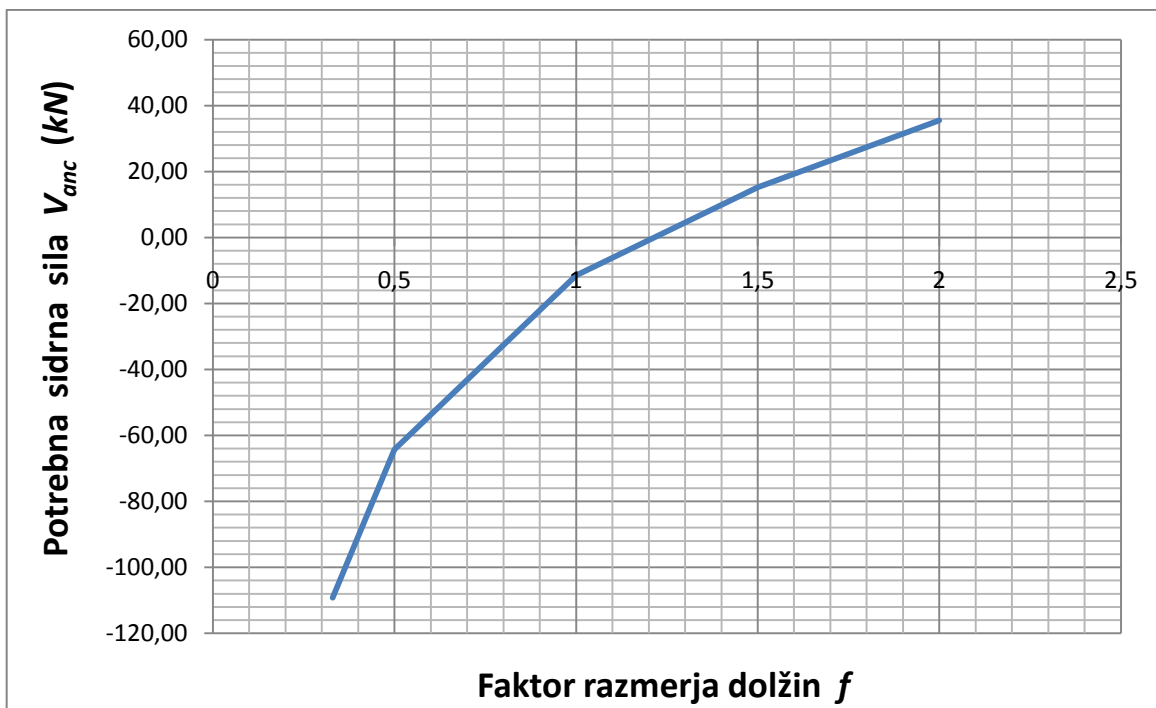
$$H_B = 12,51 + 6,75 - 55f \cdot 0,599$$

$$H_B = 19,26 - 32,945f$$

REZULTATI IN UGOTOVITVE

Tabela 5.1: Dobljene reakcije statičnega sistema $V_b=V_{anc}$.

f	V _b	V _a	H _b
2	35,49	145,76	-46,63
1,5	15,23	138,52	-30,16
1	-11,53	137,78	-13,69
0,5	-64,30	163,05	2,79
0,33	-109,18	198,58	8,39



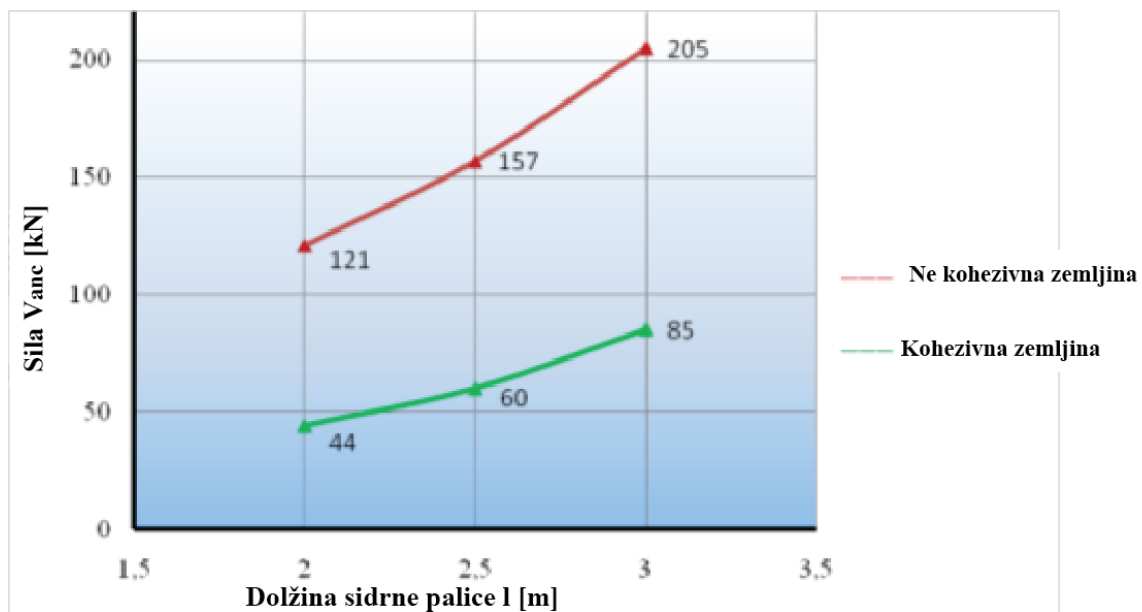
Slika 5.3: Graf razvoja potrebnih sidrnih reakcij v odnosu do faktorja razmerja dolžin.

PROJEKTNA NOSILNOST SISTEMA SPINNANKER

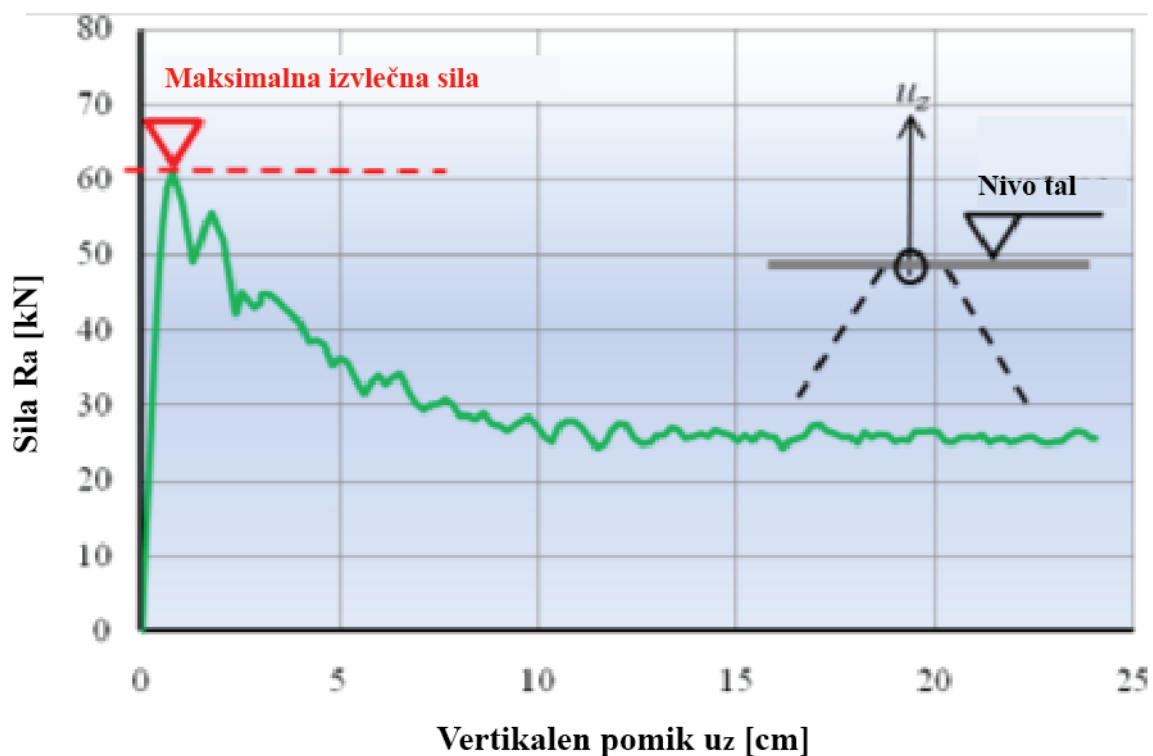
Po »in situ« testih in opravljenih računalniških analizah (Supp, 2010) lahko določimo maksimalno izvlečno silo in pomik sidra pri obremenitvi. Podatki so navedeni v spodnji tabeli in grafih, vendar bi na tem mestu omenili, da je glede na velik vpliv lastnosti zemljine pri nosilnosti pri vsaki vgradnji potrebno opraviti teste lastnosti zemljine. S takšnim postopkom je projektna določitev temeljnih sider varna in mogoča.

Tabela 5.2: Karakteristični podatki zemljine zajete v raziskavi izvlečnih sil sistema (Supp, 2010).

		Nekohezivna	Kohezivna
Tip zemljine		sa Gr	Cl Si
Gostota	γ [kN / m^3]	22	19.4
Poroznost	N [-]	0.22	0.44
Konsistenca		-	kompaktna
Kompaktnost pakiranja	D [-]	0.92	-
Kot trenja	ϕ [°]	33	23
Kohezija	c [kN / m^3]	~0	50



Slika 5.4: Graf maksimalne izvlečne sile v odnosu do dolžine sidrnih palic in tipa zemljine (Supp, 2010).



Slika 5.5: Graf razvoja vertikalnega pomika sidra pod obremenitvijo (Supp, 2010).

DOLOČITEV SIDER

Ob upoštevanju naših statičnih izračunov in podatkov raziskave (Supp, 2010) določimo in predpostavimo naslednje podatke:

$$f = 0,5 \Rightarrow L_1 = 1,25 \text{ m}$$

Dolžina sidrnih palic 3m.

Tip zemljine nekohezivna.

$$R_a = 205 \text{ kN}$$

Varnostni faktor maksimalne projektne izvlečne sile $\gamma_a = 1,5$ določen na podlagi sprejemljivega pomika.

$$R_{Ea} = \frac{R_a}{\gamma_a} = \frac{205}{1,5} = 136,66 \text{ kN}$$

Pogoj:

$$V_{anc} < R_{Ea}$$

Določimo sidra na rastru $e = 2m$.

Tako dobimo:

$$V_{anc,potr} = e \cdot V_{anc} = 2 \cdot 64,3 = 128,6 \text{ kN}$$

$$V_{anc,potr} < R_{Ea}$$

$$\underline{128,6 \text{ kN} < 136,66 \text{ kN}}$$

Sidra lahko prevzamejo obremenitve.

SKLEP IZRAČUNA

Z našim izračunom smo prišli do ugotovitve, da se uporaba sistema Spinnankor izkaže kot realna rešitev našega zastavljenega problema. Uporabili bomo sidra tipa XII z 12 palicami dolžine 3 m na razdalji 2 m. In tako zmanjšali stroške izgradnje konzole.

6 ZAKLJUČEK

Zgledovanje ljudi po naravi je logično, smiselno in pravilno. Ogromno konceptov in zasnov izvira iz naravnih vzorov. Po opravljenem raziskovalnem delu, bi si upali trditi, da je koreninski sistem eden kompleksnejših snovanj s strani narave, tako po funkciji in zahtevnosti proučevanja.

Z našim delom in delom navedenih pionirjev smo reprezentativno ovrednotili in orisali koreninski sistem in ga na koncu analogno prevedli v prakso, ki se kaže v sistemu temeljnih sider. Na koncu smo predstavili domiselno uporabo takšnega sistema v praksi in koncept tudi računsko ovrednotili. Za realizacijo vseh funkcij koreninskega sistema in praktično uporabnost le teh, bo potrebno še kar nekaj dela in sodelovanja. Vendar neodvisno od pomembnosti naših rezultatov delujemo v smeri raziskovanja še neznanega dela narave in graditeljstva, ki se skriva globoko pod zemljo. In ta kompleksna mreža korenin tvori koreninski sistem, ki neopisno opravlja pomembno vlogo v naravi in posledično v graditeljstvu, tako kot naša podzavest v našem življenju.

7 VIRI

Tabela 7.1: Uporabljena literatura

vrsta dela	citiranje v tekstu	seznam citiranih virov
knjiga	(Pohl, 2015)	Goran Pohl & Werner Nachtigall, <i>Biomimetics for Architecture & Design</i> , Springer, Švica 2015.
članek	(Fazli & Faridi)	Rakshanda F Fazli, Rashid Aziz Faridi, <i>Urbanization in Dubai: Process, Problems and Challenges</i> , Jurnal of West Asian Studies, AMU.
spletna stran	(čudežno drevo)	<i>Drevo čudežni organizem</i> . Dostopno na: < http://www.lesarska.sclj.si/images/Obvestila/2014/DREVO26052014.pdf >
spletna stran	(Wiki, Kilamba)	<i>Kilamba</i> , Wikipedia 2016. Dostopno na: < https://en.wikipedia.org/wiki/Kilamba >
članek	(Crow, 2005)	Peter Crow, <i>The influence of Soils and Species on Tree Root Depth</i> , Forestry Commission, 2005.
članek	(Perry, 1982)	Thomas O. Perry, <i>Tree roots: Facts and Fallacies</i> , Jurnal of Arboriculture, 1982.
članek	(Pregitzer, 2008)	Kurt S. Pregitzer, <i>Tree root architecture-form and function</i> , New Phytologist, 2008.
knjiga	(roots 5)	Avtor nepoznan, <i>Roots and root systems</i> , Dostopno na: » http://udspace.udel.edu/bitstream/handle/19716/2830/Chapter+5.+Roots+and+Root+Systems.pdf?sequence=10 «.
članek	(Pregitzer, 2003)	Kurt S. Pregitzer, <i>Woody plants carbon allocation and fine roots</i> , New Phytologist, 2003.
članek	(Stone & Kalisz, 1991)	E. L. Stone, J. P. Kalisz, <i>On the maximum extent of tree roots</i> , Forest ecology management, 1991, Amsterdam.
članek	(Zobel & Waisel, 2010)	R. W. Zobel, Y. Waisel, <i>A plant root system architectural taxonomy: A framework for root nomenclature</i> , Plant biosystems Vol. 144, 2010.

članek	(Crouzy, Edmaier & Perona, 2014)	Benoit Crouzy, Katharina Edmaier, Paolo Perona, <i>Biomechanics of plant anchorage at early development stage</i> , Journal of Theoretical Biology, 2014.
članek	(Battista et al. 2005)	Gian Battista Bischetti, Enrico A. Chiaradia, Tommaso, Barbara Speziali, Barbara Vitali, Paolo Vullo & Antonio Zocco, <i>Root strength and root area ratio of forest species in Lombardy</i> , Plant and soil, Springer 2005.
članek	(Briggs, 2010)	K. Briggs, <i>Charing embankment: Climate change impacts on embankment hydrology</i> , Geotechnical engineering 20, Brno 2010.
članek	(Ghestem et al. 2014)	Murielle Ghestem, Guillaume Veylon, Alain Bernard, Quentin Vanel & Alexia Stokes, <i>Influence on plant root system morphology and architectural traits on soil shear resistance</i> , Plant soil, Springer 2014.
članek	(Ghestem, Sidle & Stokes, 2011)	Murielle Ghestem, Roy C. Sidle & Alexia Stokes, <i>Influence of plant Root Systems on Subsurface flow: Implications for slope stability</i> , BioScience Vol. 61, 2011.
članek	(Mickovski et al. 2010)	S. B. Mickovski, M. F. Bransby, A.G. Bengagh, M. C. R. Davies & P. D. Hallet, <i>Resistance of simple plant root systems to uplift loads</i> , NRO Research Press, 2010.
standard	(EC7, 2005)	<i>Evrokod 7: Geotehnično projektiranje 1.del</i> , SIST, 2005.
brošura	(Okonek, 2016)	Peter Okonek, Spinnanker GmbH, <i>Spinnanker: Inovative betonlose fundament und Verankerungs technik</i> , dosegljivo na: » http://www.spinnanker.com/en/?home «, 2016.
članek	(Simmons, 2006)	Richard Simmons, <i>The cost of bad design</i> , Comission for Architecture and the Built Environment, London 2006.
spletna stran	(FGPA)	Spletna stran Fakultete za Gradbeništvo, Promet in Arhitekturo: dostopno na : » http://www.fg.um.si/o-fakulteti/fakulteta-se-predstavi/Strani/default.aspx «.

Spletna stran	(HC)	Spletna stran Harvard College: dostopno na: » https://college.harvard.edu/about/history «.
članek	(Supp, 2010)	Gregor Supp, <i>Spinanchor – a new constructional element</i> , Geotechnical engineering 20, Brno 2010.
članek	(Nagel, 2015)	Kerstin A. Nagel, <i>Effects of irradiation and soil moisture on root growth</i> , Journal of experimental Botany, 2015.
spletna stran	(Mycor)	MYCORRHIZAL ASSOCIATIONS: The Web Resource, dostopno na : » http://mycorrhizas.info/root.html «.
knjiga	(Kozlowski, 1981)	T. T. Kozlowski, <i>Water deficits and plant growth</i> , Academic Press, San Francisko, 1981.
spletna stran	(Mestni gozd)	Mestni gozd Celje, dostopno na : » http://www.celje.si/sl/kartica/mestni-gozd «.
spletna stran	(Fullgrown)	Full Grown, dostopno na : » http://fullgrown.co.uk «.
Spletna stran	(SSKJ)	Slovar Slovenskega knjižnega jezika, dostopno na: » www.sskj.si «.

8 PRILOGE

8.1 SEZNAM SLIK

Slika 2.1: Gradnja planetarija v mestu Jena, Nemčija 1925 (Pohl & Nachtigal, 2015).	5
Slika 2.2: Pool research, metoda raziskovanja (Pohl & Nachtigal, 2015).	6
Slika 2.3: Kaktus Opuntia (levo) in njegova olesenela struktura (desno) (Pohl & Nachtigal, 2015).	7
Slika 2.5: Prerez dveh različnih tipov termitnjaka a, diagram koncentracij kisika in ogljikovega dioksida v termitnjaku b (Pohl & Nachtigal, 2015).	10
Slika 2.6: Primer objekta, zgrajenega na podlagi primera termitnjaka (Pohl & Nachtigal, 2015).	11
Slika 2.7: Živalska bivališča narejena iz kompozitnih materialov (Pohl & Nachtigal, 2015).	12
Slika 2.8: Satovje in hexagonalna konstrukcija: a in b prerez in pogled čebeljega satovja; c in d Kiosk, G. Pavlov (Pohl & Nachtigal, 2015).	13
Slika 2.9: Naselbine v Afriki: a Soqota, Etiopija; b neznana vas, Etiopija; c Hara, Etiopija; d Labbezanga, Niger; e Stari Zanzibar, f Staro jedro Marakesch, Maroko (Pohl & Nachtigal, 2015).	14
Slika 2.10: Povezave med samoorganiziranimi strukturami: a milni mehurčki med ploščama stekla; b model prepuščanja peska; c razpokana struktura v porcelanu; d posušen vrhnji sloj želatine; e krilo kačjega pastirja, f javorjev list (Pohl & Nachtigal, 2015).	15
Mesto duhov ki ga postavljajo Kitajci. Na sliki še brez prebivalcev, ob dokončanju naj bi tu naselili 500.00 ljudi.	15
Slika 2.11: Kilamba, Angola(Wiki, Kilamba).	15
Slika 2.13: Struktura dolgih kosti (Pohl & Nachtigal, 2015).	17
Slika 2.14: a volumenski model kosti z ojačitvami; b ponazoritev Cullmanovega principa konzole; c in d shema ojačitev in podpor strešne konstrukcije, Univerza Freiburg; e izostatična rebra tovarna Gatti (Pohl & Nachtigal, 2015).	18
Slika 2.13: Študija lupine Velike pokrivače (Pohl & Nachtigal, 2015).	20
Slika 2.14: Primeri principa PNEU v živalskem svetu; a žabje ikre; b žabja ličinka; c izležena žabja ličinka; d delitev celic; e paglavec; f človeški zarodek v fazi razvoja (Pohl & Nachtigal, 2015).	21

Slika 2.15: Smučarski most po tensaritu principu z razponom 52 m, Francoske alpe 2005 (Pohl & Nachtigal, 2015).	22
Slika 2.16: Lahki »drevesni stebri« kot integrirana podporna struktura pri izdelavi plošč; a zasnova, kjer se prepleta primarna in sekundarna konst. (pošča in steber); c računalniški model poenostavljen kot paličje (Pohl & Nachtigal, 2015).....	23
Slika 3.1: Ilustracija drevesa in koreninskega sistema. Levo predstava večine ljudi, desno bolj realna slika (Crow, 2005).	25
Slika 3.2: Osnovni tipi koreninskih sistemov; a šopasti; b korenski; c v srčni obliki; d KS z močnim koreninom in bočnimi koreninami iz katerih se razraščajo korenine globinsko; e ploščati sistem (Perry, 1982).	26
Slika 3.3: Vpliv osvetljenosti in vlage na razrast bočnih korenin in globino koreninskega sistema (Nagel, 2015).	28
Slika 3.4: Koreninski mešiček (Mycor).....	29
Slika 3.5: Tlorisni pogled in prerez razrasta posamezne korenine, ki se razrašča v primarne, sekundarne in terciarne korenine (Perry, 1982).....	29
Slika 3.6: Odebelitev korenine glede na periodične obremenitve (Pohh & Nachtigall, 2015).	30
Slika 3.7: Vpliv talne vode na razrast dreves v 22 let starem nasadu rdečega in belega bora. H- povprečna višina, D- povprečen premer v višini prsi (Kozłowski, 1981).....	31
Slika 3.8: Posamezni koraki raziskave; a testni zaboj iz dveh delov, b rastlinje posajeno v zabojih, c naprava Casagrande za izmero direktnega striga, d štirje sektorji zemljine za določitev smeri rasti glede na strižno silo (puščica), e sektorji določitve kota razrasti korenin (Ghestem et al. 2014).	34
Slika 3.9: Rezultati strižnih testov (Ghestem et al. 2014).	35
Slika 3.10: Različni tipi koreninskih sistemov testnih rastlin, a <i>J. curcas</i> , b <i>R. chinensis</i> , c <i>R. communis</i> (Ghestem et al. 2014).	36
Slika 3.11: (Ghestem, Sidle & Stokes, 2011).	37
Slika 3.13: Natezna trdnost v odnosu do premera različnih vrst dreves (Battista et al. 2005).	41
Slika 3.14: Drevesna hiša v Celjskem mestnem gozdu (Mestni gozd, 2016).	42
Slika 3.15: Primer izraščenege pohištva (Fullgrown, 2016).	43
Slika 4.1: Slika sistema Spinnanker (Okonek, 2016).	44

Slika 4.2: Uporaba kot sidrni element pod samo natezno obremenitvijo (Okonek, 2016).	45
Slika 4.3: Uporaba kot temeljno sidro, natezno in tlačno obremenjen element (Okonek, 2016).....	45
Slika 4.4: Montaža temeljnih sider (Okonek, 2016).....	47
Slika 4.5: Izgrajen objekt na sidrih (Okonek, 2016).....	47
Slika 4.6: Detalj stika objekta in sider (Okonek, 2016).....	47
Slika 5.1: Geometrijska zasnova računskega primera.	48
Slika 5.2: Statični sistem računskega primera.	51
Slika 5.4: Graf maksimalne izvlečne sile v odnosu do dolžine sidrnih palic in tipa zemljine Ra (Supp, 2010).....	54
Slika 5.5: Graf razvoja vertikalnega pomika sidra pod obremenitvijo (Supp, 2010).....	54

8.2 SEZNAM TABEL

Tabela 2.1: Primeri zgodnjih lupini podobnih struktur in razmerje med razponom in debelino lupine; **a** tržnica, Alžirija 1955; **b** Palazzetto dello sport, Rim 1956; **c** arena, Kanada 1958; **d** tovarna, Jena 1923; **e** jajčna lupina; **f** Pantheon, Rim 2. stoletje (Pohl & Nachtigal, 2015). 19

Tabela 3.1: Hidrološki in mehanski mehanizmi, ki vplivajo na stabilnost zemeljskih pobočijih, ter njihov vpliv na površinske in globinske plazove; **A** negativen vpliv, **B** pozitiven vpliv, **m** marginalen v.(Ghestem, Sidle & Stokes, 2011). 33

Tabela 3.3: Izmerjeni parametri odnosa odpornosti in premera korenin (Battista et al. 2005). 40

Tabela 5.1: Dobljene reakcije statičnega sistema $V_b = V_{anc}$. 52

Tabela 5.2: Karakteristični podatki zemljine zajete v raziskavi izvlečnih sil sistema (Supp, 2010). 53

8.3 NASLOV ŠTUDENTA

Matevž Podbreznik

Cvetlična ul. 5

3000 Celje

e-mail: matevz.podbreznik@gmail.com

8.4 KRATEK ŽIVLJENJEPIS

Rojen v Celju, študiral v Ljubljani, Celju in Mariboru.

Do sedaj v življenju naredil več dobrih kot slabih stvari.

Vedno se rad učim.

Tudi zelo rad učim, predvsem otroke ker še nimajo toliko predsodkov in ne poznajo strahu.

S tem delom zaključil svoje formalno izobraževanje.

In sedaj lahko dejansko pričnem izdelovati in uresničevati svoje zamisli in ideje.