



Co-funded by
the European Union

Light and the Brain: Exploring Neurons and Light Sensitivity



BIOS4YOU
AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY

Project Number: KA220-BW-23-30-126516

"Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them."





SISUKORD

· Sissejuhatus.....	2
· Loodus kui eeskuju ehitatud keskkonna kujundamisel.....	3
· Looduse lahendused inimkonna ees seisvatele väljakutsetele.....	4
· Tõhus linnaplaneerimine ja linnavoogude liikumine.....	6
· Bioinspireeritud lähenemisviisid.....	7
· Kuidas bioloogilised süsteemid inspireerivad jätkusuutlikku disaini.....	8
· Termiidimäed: passiivne termoregulatsioon ja ventilatsioon.....	11
· Lootoseleht: isepuhastuvad pinnad.....	12
· Namibi kõrbe mardikas: vee kogumine õhust.....	13
· Liitreaalsuse rakendamine loodusest inspireeritud disaini uurimiseks STEM-hariduses....	15
· Ressursid.....	18





Õppeteema üldine teema	Loodusest inspireeritud hooned: kuidas taimed ja loomad aitavad meil paremaid linnu kujundada
Õppeüksuse täpne nimetus	Biodisain linnaarhitektuuris
Sihtkasutaja vanus	14–18 aastat
Õppija eeltingimused	Bioloogia, füüsika ja keskkonnateadus
Õppeüksuse kirjeldus	See õppeüksus juhendab õpilasi ja õpetajaid uurima, kuidas taimede ja loomade looduslikud strateegiad saavad inspireerida jätkusuutlikke lahendusi arhitektuuris ja linnaplaneerimises. Multidistsiplinaarse lähenemisviisi ja liitreaalsuse (AR) tööriistade abil avastavad õppijad, kuidas bioloogilised süsteemid saavad viia uuendusliku hoone- ja linnaplaneerimiseni, mis reageerib kliimale, funktsioonile ja heaolule.
Asjaomane teema	Bioloogia, füüsika, keskkonnateadus, kunst/disain, geograafia, matemaatika
Märksõnad	Biomimikri, loodusest inspireeritud arhitektuur, jätkusuutlikud linnad, biodisain, linnaökoloogia, roheline innovatsioon, liitreaalsus, interaktiivne õpe
Põhioskused, võimed ja teadmised, mida saab omandada	Mõista, kuidas bioloogilisi põhimõtteid saab rakendada arhitektuuriliste ja linnade väljakutsete lahendamisel Tuvastage bioinspireeritud hoonete ja neid inspireerinud looduslike organismide näiteid. Õpi, kuidas loodust eeskujuna kasutades kliimale reageerivaid ehitisi kujundada Arendada loovust ja probleemide lahendamise oskust AR-põhiste disainitegevuste kaudu Uurige regeneratiivse ja säästva linnakeskkonna kontseptsiooni
Kasutatud ressursid ja didaktilised vahendid	Uurimistööd, raamatud, teadusandmebaasid, veebiseminaride tulemused, veebipõhised ressursid, liitreaalsuse tööriistad (nt JigSpace, Assemblr EDU, Merge Cube, CoSpaces Edu).





Hindamiskriteeriumid ja hindamine	Kursuse jooksul omandatud teadmiste, oskuste ja võimete põhjal, sh liitreaalsusel põhinevate hindamiste, näiteks simulatsioonide, prototüüpide loomise ja tagasiside põhjal.
-----------------------------------	--

Sissejuhatus

Linnadest on saanud inimkonna elu ja arengu keskmeks, kuna maailm linnastab. Kuna ülemaailmne rahvastiku kasv kiireneb, neelavad linnapiirkonnad suurema osa sellest kasvust. ÜRO elupaikade aruande (Judith Oginga, 2022) kohaselt elab 2050. aastaks linnades ligi 70% maailma elanikkonnast. See kiire linnade laienemine avaldab looduslikele süsteemidele tohutut survet, kuna linnad sõltuvad oma tegevuse ja elanike ülalpidamiseks suuresti välistest ressurssidest.

Ajalooliselt on paljud linnakeskkonnad projekteeritud ümbritsevaid ökosüsteeme arvestamata. Nagu Othmani jt (2022) märkisid, on paljud ehitatud keskkonnad arenenud justkui loodusest eraldiseisvana, mille tulemuseks on struktuurid ja süsteemid, mis sageli häirivad ökoloogilist tasakaalu. See lahusus on viinud habraste linnasüsteemideni, mis ei ole kliimamuutustele, bioloogilise mitmekesisuse vähenemisele ja ressursside ammendumisele reageerimiseks valmis. Vastupidavamate linnade loomiseks peab tulevane areng olema kooskõlas ökoloogiliste põhimõtetega, toetades inimeste heaolu, ressursside taastavat kasutamist ja integreerumist looduseskeskkonnaga.

Linnastumise põhjustatud keskkonnaseisundi halvenemisele reageerides on linnad üle maailma hakanud rakendama lahendusi, mis püüavad saavutada paremat tasakaalu ühiskonna ja looduse vahel. Üks tekkiv lähenemisviis on looduspõhiste lahenduste (LSL) kasutamine. Maailmapank tutvustas seda kontseptsiooni esmakordselt 2008. aastal ja Euroopa Komisjon määratles selle ametlikult 2015. aastal (Sowińska-Świerkosz ja García, 2022). Euroopa Komisjon kirjeldab LSL-e kui loodusest inspireeritud, toetatud või otseselt looduse eeskujul loodud tegevusi. Sarnaselt määratleb Rahvusvaheline Looduskaitsealiit (IUCN) looduspõhiseid lahendusi kui „tegevusi looduslike või muudetud ökosüsteemide kaitsmiseks, säästvaks majandamiseks ja taastamiseks“ (Matthews jt, 2022).

Hiljutised uuringud toovad esile, et looduspõhise infrastruktuuri roll linnades ulatub ökoloogilisest taastamisest kaugemale. Kuigi need strateegiad on bioloogilise mitmekesisuse parandamiseks üliolulised, pakuvad need ka laiemat kasu sotsiaalsel ja majanduslikul tasandil. Näiteks roheline infrastruktuuri, näiteks linnametsade, märgalade või roheliste katuste integreerimine võib parandada rahvatervist, suurendada kliimamuutustele vastupanuvõimet, luua kohalikke töökohti ja aidata kaasa sotsiaalsele ühtekuuluvusele. Sellisena tunnustatakse looduspõhiseid lahendusi üha enam oluliste vahenditena jätkusuutliku, kaasava ja vastupidava linnakeskkonna loomiseks.





Kiire linnastumise, keskkonna halvenemise ja kliimamuutuste eskaleeruva mõju tõttu on meie linnade disaini ümbermõtestamine muutunud ülemaailmseks imperatiiviks. Tavapärase linnaarengu meetodid tuginevad ressursimahukatele tehnoloogiatele, mis aitavad kaasa reostusele, energia raiskamisele ja ökosüsteemi häirimisele. Paljutõotav alternatiiv, mis on arhitektuuris ja linnaplaneerimises populaarsust kogumas, on bioinspiratsiooni kontseptsioon, tuntud ka kui biomimikri. See lähenemisviis hõlmab looduses leiduvate strateegiate uurimist ja jäljendamist inimeste disainiprobleemide lahendamiseks. 3,8 miljardi aasta pikkuse evolutsiooni jooksul on loodus välja töötanud väga tõhusad ja vastupidavad süsteemid, mis toetavad elu ressursse ammendamata. Nagu Benyus (1997) kuulsalt ütles: „Elu loob eluks soodsad tingimused” – see on biomimeetilise mõtlemise keskmes olev filosoofia.

Hea näide bioinspiratsiooni rakendamisest praktikas on Eastgate'i keskus Harares Zimbabwe. See arhitekt Mick Pearce'i projekteeritud hoone on inspireeritud termiidimägede struktuurist, mis suudavad säilitada sisetemperatuuri stabiilsust passiivsete ventilatsioonimehhanismide abil. Nagu Kennedy jt (2015) kirjeldasid, kasutab Eastgate'i keskus seda mudelit energiatarbimise vähendamiseks kuni 90% võrreldes traditsiooniliste mehaaniliste kliimaseadmetega hoonetega. See juhtum illustreerib, kuidas bioloogiliste põhimõtete mõistmine võib viia energiatõhususe ja jätkusuutlikkuse murranguliste parandusteni.

Teine laialdaselt uuritud juhtum on lootoseleht, mille mikroskoopiline pinnastruktuur põhjustab vee tilkumist ja veeremist, puhastades lehte. See on inspireerinud isepuhastuvate materjalide väljatöötamist, mida nüüd kasutatakse arhitektuuris, vähendades veekasutust ja hoolduskulusid (Vincent jt, 2006). Samamoodi on kaktuse naha soojust peegeldavad ja vett koguvad omadused mõjutanud hoonete projekteerimist kuivades piirkondades, mis vajavad uuenduslikke soojust- ja veemajanduslahendusi.

Lisaks üksikutele hooneelementidele pakub biomimikri ka süsteemseid teadmisi. Puude hargnemismustreid ja juurestikku on rakendatud linnatranspordi ja veesüsteemide paigutuse optimeerimiseks, tõhusate jaotusvõrkude modelleerimiseks ja energiakadude minimeerimiseks linnas (Vincent jt, 2006). Need näited toovad esile, kuidas bioinspiratsioon on loominguine, teaduslik ja strateegiline protsess, mis põhineb vaatlusel, analüüsil ja süsteemsel mõtlemisel.

Et muuta need kontseptsioonid gümnaasiumiõpilastele (vanuses 14–18) arusaadavaks ja kaasavaks, hõlmab see koolitusüksus keskse tööriistana liitreaalsust (AR). AR võimaldab õppijatel uurida looduslikke süsteeme 3D-s, suhelda peidetud bioloogiliste struktuuridega ja võrrelda neid otse inimeste loodud projektidega. See kaasahaarav kogemus toetab kontseptuaalset õppimist ja loomingulist uurimist, pakkudes silda bioloogiateaduse, keskkonnahariduse ja digitehnoloogia vahel. Loodusest inspireeritud hoonete projekteerimisel AR-is saavad õpilased katsetada ideedega ilma materiaalsete piiranguteta, edendades jätkusuutlikkuse teadlikkust ja uuenduslikku mõtlemist.

Lõppkokkuvõttes on selle mooduli eesmärk inspireerida järgmist arhitektide, inseneride ja keskkonnakaitsjate põlvkonda, näidates neile, et mõned kõige uuenduslikumad linnaplaneerimise lahendused on looduse poolt juba leiutatud. Praktilise suhtluse ja teadusliku





mõtiskluse kaudu näevad õpilased ehitatud keskkonda mitte loodusmaailmast eraldiseisvana, vaid millegi sellisena, millest saab õppida ja millegagi koos eksisteerida.

Loodus kui eeskuju ehitatud keskkonna kujundamisel

Loodus on pikka aega olnud arhitektuuri inspiratsiooniallikaks, mõjutades läbi ajaloo mitmesuguseid disainiliikumisi. Alates Gaudí biomorfsetest vormidest kuni Santiago Calatrava kaasaegsete teoste struktuurse elegantseni ammutavad mõlemad suuresti inspiratsiooni looduse mustritest ja geomeetriatest. Kui varasem loodusest inspireeritud arhitektuur keskendus sageli esteetikale, siis nüüd on kasvav trend interdistsiplinaarse disaini poole, mis otsib enamat kui lihtsalt visuaalset inspiratsiooni. See tekkiv lähenemisviis hõlmab bioloogilisi strateegiaid, mis aitavad vähendada loodusvarade tarbimist ja süsinikdioksiidi heitkoguseid, viies arhitektuuri vastavusse üleminekuga industriaalsest ajastust ökoloogilisele ajastule (Dixit ja Stefańska, 2023).

Looduse võime kohaneda muutuvate keskkonnatingimustega on teadusdistsipliinides hästi dokumenteeritud (Jamei ja Vrcelj, 2021). Nagu Wu jt (2020) märkisid, on bioinspireeritud disaini peamine eesmärk taastada keskkonna funktsioonid ja maastikumustrid, muutes ehitatud keskkonna tõhusamaks, vähese süsinikuheitega ja vastupidavamaks süsteemiks. Märkimisväärse näite pakub Hiina, kus säästva ökoloogia põhimõtete rakendamine viimase 50 aasta jooksul on viinud looduslike ökosüsteemide taastamiseks loodud linnade arenguni. Need "ökolinnad" rõhutavad integreeritud lahendusi viies põhisüsteemis: energia, toit, transport, jäätmed ja vesi.

Ehitatud keskkonnas on bioinspireeritud disain avaldunud mitmel moel, eriti biomimikri kasvava kasutuselevõtu kaudu. Viimase kümnendi jooksul on biomimikri saanud paljude kaasaegsete arhitektuuriprojektide määravaks aspektiks. Ferwati jt (2019) sõnul on biomimeetilise disaini praktikas esile kerkinud üheksa peamist omadust: vorm ja funktsioon, geomeetria, metafoor, materjal, liikumine, muster, proportsioon, jätkusuutlikkus ja tehnoloogia. Need omadused peegeldavad mitmekesiseid viise, kuidas looduslikud printsiibid tõlgitakse arhitektuurikeelde.

Hiljutised uuringud rõhutavad ka looduse kontseptuaalset raamistamist teejuhina disainiprotsessis. Oguntona ja Aigbavboa (2023b) väidavad, et looduse vaatlemine mentorina muudab loodusliku ökosüsteemi väärtuslikuks tugipunktiks pidevaks õppimiseks ja loominguliseks innovatsiooniks. Nad tuvastavad bioinspireeritud disainis kolm põhimõtet: imiteerimine, emuleerimine ja inspiratsioon. Need mõõtmised võimaldavad disaineritel uurida loodust struktuurimudelite ning protsessipõhiste ja süsteempõhiste strateegiate jaoks. Nagu Oguntona ja Aigbavboa (2023a) lisaks märgivad, on nende lähenemisviiside integreerimisel ehitatud keskkonna kujundamisse suurepärane potentsiaal keskkonnaseisundi halvenemise vähendamiseks ja ressursside kasutamise minimeerimiseks.

Looduse lahendused inimkonna väljakutsetele

Eskaleeruvate keskkonna- ja sotsiaalsete väljakutsete ees seisavad linnad kogu maailmas üha suurema surve all muutuda jätkusuutlikumaks, vastupidavamaks ja kohanemisvõimelisemaks.





Traditsioonilised linnaplaneerimise lähenemisviisid ei suuda sageli neid keerulisi nõudmisi lahendada, mis ajendab paljusid arhitekte, insenere ja disainereid otsima juhiseid loodusest. See lähenemisviis, mida tuntakse bioinspiratsiooni või biomimikri nime all, hõlmab looduse poolt miljardite aastate jooksul välja töötatud vormide, protsesside ja süsteemide uurimist ning nende aluspõhimõtete tõlkimist inimkeskseteks disainilahendusteks. Erinevalt lihtsast imitatsioonist keskendub biomimeetika, nagu seda defineerisid Vincent jt (2006), funktsionaalsete strateegiate eraldamisele bioloogilistest süsteemidest, et lahendada inimprobleeme uuenduslikel ja jätkusuutlikel viisidel. Loodus pakub tohutut hulka testitud lahendusi, millest igaüks on täiustatud evolutsioonilise katse-eksituse meetodil, et saavutada maksimaalne efektiivsus minimaalse jäätmega. Selles osas uurime, kuidas bioinspireeritud mõtlemist saab rakendada viiele kriitilisele linnaprobleemile, paljastades, kuidas organismid ja ökosüsteemid aitavad meil oma linnade tulevikku ümber kujundada.

- Passiivne temperatuuri reguleerimine

Sisetemperatuuri reguleerimine ilma energiamahukatest süsteemidest sõltumata on linnaarhitektuuri üks peamisi väljakutseid. Näiteks Sahara-taguses Aafrikas säilitavad termiidimäed stabiilse sisetemperatuuri vaatamata välistele kõikumistele, kasutades keerukaid tunnelisüsteeme, mis hõlbustavad passiivset õhuvoolu. See looduslik mehhanism inspireeris Eastgate Centre'i projekteerimist Harares Zimbabwes – ärihoonet, mis kasutab sarnaseid passiivseid ventilatsioonitehnikaid, et vähendada energiatarbimist kuni 90% võrreldes traditsiooniliste hoonetega (Turner & Soar, 2008).

- Vee kogumine ja säilitamine

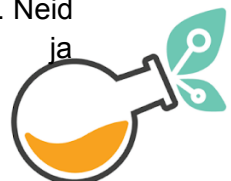
Taimed ja loomad on kuivas keskkonnas vee kogumiseks ja säilitamiseks välja töötanud spetsiaalsed meetodid. Kaktus kasutab ribilist pinda, et suunata kaste tõhusalt oma juurte poole. Samal ajal kasutab Namiibi kõrbe mardikas oma kestel vaheldumisi hüdrofoobseid ja hüdrofiilseid mustreid, et õhust vett kondenseerida ja koguda. Nendest organismidest inspireerituna on insenerid välja töötanud udu koguvad hooned ja katusesüsteemid, mis on võimelised atmosfäärist vett ammutama ilma pumpade või kemikaalideta (Nørgaard jt, 2012).

- Isepuhastuvad ja vähe hooldust vajavad pinnad

Hoonete hooldus nõuab sageli märkimisväärset vee ja kemikaalide kasutamist. Looduses on lootoseleht aga arendanud nanostruktuuriga pinna, mis tõrjub vett ja kannab kuivades mustuseosakesi minema. See nähtus, mida tuntakse lootoseefektina, on viinud isepuhastuva klaasi, päikesepaneelide ja fassaadikatete väljatöötamiseni, mis vähendavad hooldusvajadust, suurendades samal ajal vastupidavust ja puhtust (Barthlott & Neinhuis, 1997; Koch jt, 2009).

- Kerged, kuid vastupidavad konstruktsioonid

Loodus saavutab minimaalse materjalikogusega sageli märkimisväärse tugevuse. Ämbliku siid on silmapaistev näide, mille tõmbetugevus on oma kaalu kohta suurem kui terasel. Mesitarude ja teiste organismide kärgstruktuurid jaotavad pinget tõhusalt, säästes samal ajal materjali. Neid mudeleid kasutatakse laialdaselt moodulkonstruktsioonides, lennunduses ja





arhitektuuripaneelide disainis, et vähendada koormust ja ressursikasutust, säilitades samal ajal konstruktsiooni terviklikkuse (Fratzl & Barth, 2009; Vincent jt, 2006).

Tõhus linnaplaneerimine ja voolavus

Looduslikes süsteemides on puude hargnevad struktuurid, juurestik ja veresoonkond optimeeritud jaotama ressursse, nagu vesi, toitained ja energia, minimaalse takistusega. Linnaplaneerijad ja taristu projekteerijad on üha enam pöördunud nende looduslike mustrite poole, et teavitada transpordivõrkude, jalakäijate teede ja kommunaalteenuste süsteemide projekteerimisest. Need biomimeetilised disainilahendused parandavad ühenduvust, vähendavad ummikuid ning võimaldavad detsentraliseeritud energia- ja veejaotust, parandades vastupidavust ja tõhusust. Nagu Badarnah (2017) rõhutab, pakuvad ökoloogilistest hargnevatest süsteemidest tulenevad biomimeetilised põhimõtted praktilisi strateegiaid linnade kohandamiseks keerukate keskkonna- ja sotsiaalsete nõudmistega, säilitades samal ajal harmoonia loodusmaastikuga.

Biomimikriat saab rakendada kolmel tasandil: vormi, protsessi ja süsteemi tasandil. Vormi tasand hõlmab organismi, selle osa või selle produktsiooni spetsiifilisest vormist tuleneva funktsiooni jälgendamist. See tasand keskendub looduses leiduvale morfoloogiale. Biomimikri protsessi tasand jälgendab organismide või organismirühmade käitumist või tootmisprotsesse. Lõpuks jälgendab süsteemi tasemel biomimikri ökosüsteemide toimimist, põhimõtteid ja strateegiaid (Jain jt, 2023). Linnade kontekstis on keerulised süsteemid, mis hõlmavad inimesi, infrastruktuuri, keskkonnakonteksti ja...

Seoste osas on ökosüsteemid kõige asjakohasem ja sobivam inspiratsioonitase. Ökosüsteemid koosnevad biotilistest elementidest, mis on analoogsed inimlinna ehitatud komponentidega, ja abiotilistest elementidest, mida saab võrrelda linnakeskkonna ja kontekstiga. Lisaks hõlmavad ökosüsteemid nende elementide vastastikmõju.

Madmar jt (2023) pakkusid joonisel 1 välja paralleeli ökosüsteemi koostise ja linnasüsteemi koostise ja toimimise vahel. Kuigi ökosüsteemi tasemel biomimikri saab hõlmata vormi ja protsessi tasemel biomimikriat, arvestab see süstemaatiliselt laiemat ulatusega eeliseid. See lähenemisviis pakub linnade süstemaatiliste probleemide lahendamiseks terviklikumaid ja paremini kohandatud lahendusi. Varasemad analoogiad inimorganismi ja praeguste linna ainevahetust käsitlevate tööde vahel on piiratud ja käsitlevad peamiselt linnavoolu probleemi (Dicks jt, 2021).



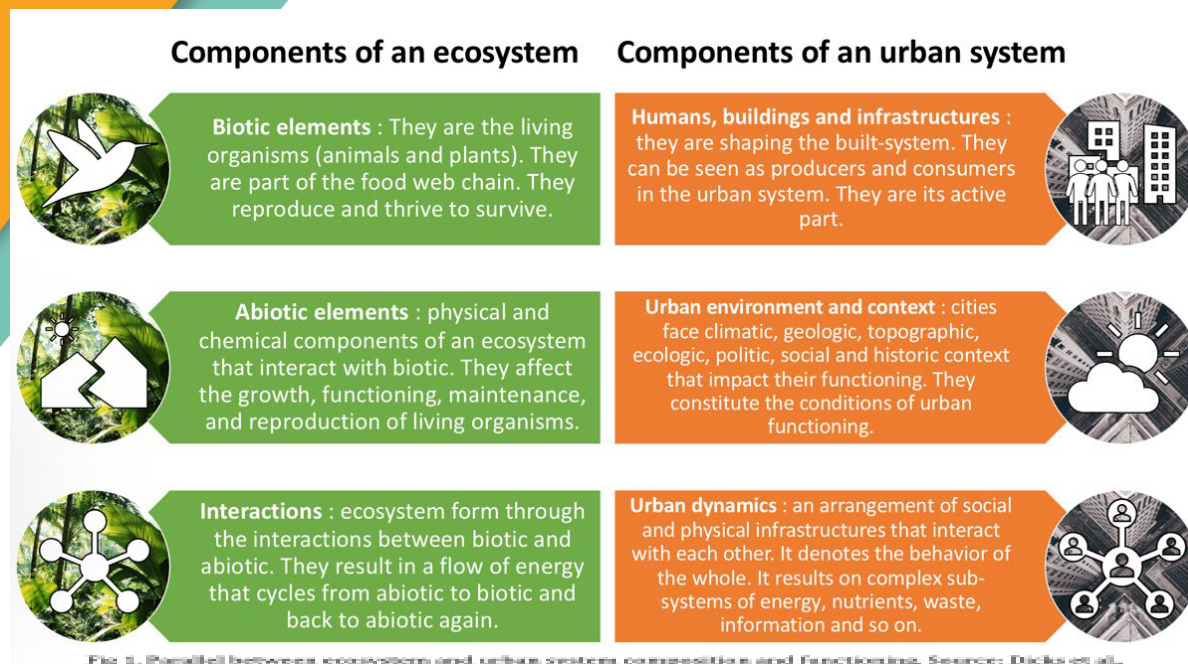


Fig. 3. Parallel between ecosystem and urban system composition and functioning. Source: Dickie et al., 2021.

INCLUDE PICTURE
"https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/542b0d79e4b0a28c59e2b52a0/1511-94d7-497-1-6143-710323db0a47/Screen+Shot+2023-05-30+at+10:25:13+AM.png" /" MERGEPHONUMINET

Bioinspireeritud lähenemisviisid:

Loodusest inspireeritud lähenemisviise on esinenud paljudes valdkondades, sealhulgas arhitektuuris ja linnaplaneerimises, kusjuures bioonika, biomimeetika ja biomimikri on kolm bioinspireeritud disainilähenemist, millele tavaliselt viidatakse. Üldise terminoloogiana hakkas bioonikat rakendama 1958. aastal Jack Steeli poolt bioloogia ja tehnika kombinatsioonina; see keskendub looduse mehaanilistele võimetele, ammutades inspiratsiooni selle füüsikalistest põhimõtetest tehnilise disaini väljatöötamisel. Selle praktika võib aga viia jätkusuutmatute lahendusteni, kuna see ei arvesta nende lahenduste koosmõju jätkusuutlikkusega (Landrum ja Mead, 2022). Samal ajal kannab biomimeetika mõistmise ja analüüsi kaudu looduse omadusi, kvaliteete ja süsteeme üle tehiskeskkonda (Urdinola-Serna ja disain, 2018). Mõiste biomimeetika, mis tuleneb tüvedest bios (elu) ja mimesis (jäljendama), pärineb aastast 1969 tänu biofüüsikule ja insenerile Otto Schmittile ning keskendub peamiselt looduse jäljendamisele nii rakenduses kui ka vormis. Lõpuks defineeris Benyus biomimikri 1997. aastal kui teadust, mis jäljendab looduse mudeleid. See omakorda kasutab ökoloogilist standardit, mis mõõdab selle koostoimet keskkonnaga, mis viib selle sammu võrra kaugemale bioonilisest ja biomimeetilisest, muretsedes selle rakendamise jätkusuutlikkuse pärast (Landrum ja Mead, 2022).

Biomimikri disainiprotsess järgib tavaliselt kahesuunalist meetodikat, mis hõlmab kahte teineteist täiendavat lähenemisviisi, nagu on välja toonud Bader jt (2021), Chayaamor-Heil (2023) ning Urdinola-Serna ja Diseño (2018). Esimene on probleemikeskne lähenemisviis, kus disainerid alustavad konkreetse disainiväljakutse või -eesmärgi kindlakstegemisest. Kui probleemi parameetrid on selgelt määratletud, otsivad nad loodusest strateegiaid, mida kasutavad taimed, loomad või ökosüsteemid, mis võivad pakkuda elujõulisi lahendusi.





Teine on lahendustele orienteeritud lähenemine, mis pärineb sageli bioloogiateadustest. Selle meetodi puhul alustavad teadlased või teaduslikult informeeritud disainerid bioloogiliste süsteemide või käitumismallide uurimisega, millel on huvitavad või tõhusad funktsioonid. Seejärel analüüsitakse neid looduslikke strateegiaid nende potentsiaalse olulisuse osas inimeste disainiprobleemide puhul, võimaldades bioloogilistel teadmistel suunata uuenduslike arhitektuuriliste või insenerilahenduste väljatöötamist.

Need kaks lähenemisviisi peegeldavad biomimikri interdistsiplinaarset olemust, võimaldades disainiprobleemidel ja bioloogilistel teadmistel üksteist pidevas, iteratiivses protsessis teavitada.

Kuidas bioloogilised süsteemid inspireerivad jätkusuutlikku disaini

Bioinspireeritud disaini ehk biomimikriat tunnustatakse üha enam loomingulise lähenemisviisina ja range teadusliku meetodikana jätkusuutlikkuse probleemide lahendamiseks ehitatud keskkonnas. Aameri jt (2020) sõnul võimaldab biomimikri disaineritel liikuda looduse pealiskaudsest jäljendamisest kaugemale ja bioloogiliste põhimõtete sügavama integreerimise poole hoone toimivusse. See hõlmab analüüsi, kuidas organismid oma keskkonnaga kohanevad, energia-, vee- ja materjalivoogusid haldavad ning kuidas nende sisemine käitumine saab inspireerida süsteemseid arhitektuurilisi lahendusi.

Põhikontseptsioon on ökosüsteemides täheldatav suletud ahelaga materjali- ja energiavoog. Metsas saavad ühe organismi jäätmed teise toiduks; midagi ei visata ära. Linnadisainerid hakkavad seda mudelit omaks võtma ringlinnasüsteemide kaudu, kus jäätmed, vesi ja energia taaskasutatakse. See süsteemitasandi mõtlemine peegeldab ökosüsteemide loogikat ja toetab vastupidavat linnainfrastruktuuri (Kennedy jt, 2015). Isegi organismide struktuur mõjutab disaini. Näiteks on karpkala kuju inspireerinud aerodünaamilisi autosid ja hoonete fassaade tänu oma optimeeritud struktuurile õhutakistuse vähendamiseks (Bar-Cohen, 2012). Need näited illustreerivad, et loodus pakub nii funktsionaalseid mudeleid kui ka disainipõhimõtteid, mis saavad otseselt mõjutada seda, kuidas me tulevase linna kujundame.

Üks olulisemaid nihkeid, mida hiljutistes uuringutes propageeritakse, on üleminek looduse vormide matkimiselt selle funktsiooni ja käitumise mõistmisele ja kopeerimisele. Aameri jt (2020) rõhutavad selle ülemineku olulisust, tuues esile lünga varasemates arhitektuuripraktikates, mis kasutasid sageli looduslikku esteetikat ilma funktsionaalset jätkusuutlikkust saavutamata. Probleempõhise biomimeetilise lähenemisviisi abil pakuvad nad välja meetodika, mis keskendub hoone käitumisele, sealhulgas energiatõhususele, soojusmugavusele, materjalide toimivusele ja keskkonnatundlikkusele. See protsess algab arhitektuuriliste väljakutsete tuvastamisest ja lahenduste otsimisest bioloogiliste eeskujude hulgast, mis on arenenud sarnaste tingimuste ületamiseks.

Nende uuringus kirjeldatud meetodika hõlmab bioloogiliste süsteemide simuleerimist eksperimentaalse abstraktsiooni kaudu ja nende teisendamist arhitektuurilisteks prototüüpideks. See hõlmab biomimikri kolme tasandit: organismi tasand (konkreetne vorm või funktsioon), käitumise tasand (interaktsioon keskkonnaga) ja ökosüsteemi tasand (süsteemsed vood ja





seosed). Käitumise tasand on eriti rõhutatud, kuna see võimaldab hoonetel reageerida adaptiivselt, sarnaselt sellele, kuidas elusorganismid reguleerivad soojust, niiskust või valgust.

- Biomimikri disaini tasemed

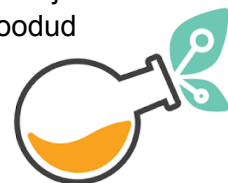
Biomimeetilist disaini saab rakendada erinevatel tasanditel, olenevalt sellest, kuidas disainerid looduslikke ideid tõlgendavad ja neist ammutavad. Bader jt (2021) ja Chayaamor-Heili (2023) sõnul toimib biomimikri kolmel peamisel tasandil: organism, käitumine ja ökosüsteem.

Organismi tasand hõlmab otsest inspiratsiooni konkreetset taimelt või loomalt. See võib hõlmata kogu organismi replikatsiooni või keskendumist konkreetsele struktuurilisele või funktsionaalsele omadusele, mida saab rakendada disainiprobleemile. Käitumise tasand keskendub sellele, kuidas elusorganism suhtleb oma keskkonnaga. See hõlmab adaptiivsete tegevuste uurimist, näiteks kuidas teatud liigid temperatuuri, niiskust või liikumist ümbritsevasse keskkonda haldavad. Ökosüsteemi tasand läheneb asjale laiemalt, tuginedes põhimõtetele, mis võimaldavad ökosüsteemidel tõhusalt ja säästvalt toimida. Nende hulka kuuluvad energiaringlus, bioloogiline mitmekesisus, sümbiootilised suhted ja vastupidavus.

Biomimeetilise tõlgenduse edasist täiustust leiab Mirniazmandani ja Rahimianzarifi (2017) tööst, kes pakuvad välja viis imitatsiooni alatasandit: vorm, materjal, konstruktsioon, protsess ja funktsioon. Need võimaldavad disaineritel isoleerida bioloogiliste süsteemide spetsiifilisi aspekte, mis võivad olla ehitatud keskkonna jaoks olulised. Lisaks kirjeldavad Oguntona ja Aigbavboa (2023a) kolme kontseptuaalset lähenemisviisi bioinspiratsiooniga töötamiseks: imitatsioon, emuleerimine ja inspiratsioon. Need dimensioonid ulatuvad looduse vormide otsesest kopeerimisest abstraktsete ideede joonistamiseni ja nende loomingulise rakendamiseni disainiprobleemide lahendamiseks.

Seotud kontseptsioon, mis toetab nihet loodusest integreeritud disaini poole, on biofiilia. Kuigi seda tehniliselt ei liigitata bioinspireeritud disaini alla, edendab biofiilne disain sidet inimeste ja looduse vahel. Edward O. Wilsoni ja Stephen Kellerti definitsiooni kohaselt viitab biofiilia inimese loomupärasele kalduvusele otsida kontakti loodusega. See kontseptsioon on juurdunud meie evolutsioonijaloos ja bioloogilises arengus. Calabrese (2015) sõnul on biofiilse disaini eesmärk taastada see kaotatud side tänapäevastes keskkondades, kaasates keskkonnaomadusi, looduslikke vorme, päevavalgust, ruumilist mitmekesisust ja kohalikku identiteeti. Need strateegiad aitavad kaasa ruumidele, mis toetavad inimeste heaolu kognitiivses, emotsionaalses ja füüsilises dimensioonis.

Lisaks biomimikrile ja biofiiliale on kasvav huvi eristada looduspõhiseid lahendusi (NbS) ja loodusest inspireeritud lahendusi (NiS). Looduspõhised lahendused on tavaliselt seotud elusökosüsteemidega ja tuginevad nende jätkuvatele ökoloogilistele funktsioonidele vee puhastamisel, süsiniku säilitamisel või kliima reguleerimisel. Seevastu loodusest inspireeritud lahendused, sealhulgas biomimikri, tulenevad looduses täheldatud põhimõtetest ja strateegiatest, kuid ei vaja toimimiseks toimivaid ökosüsteeme. Nagu IUCN (2020b) on välja toonud, viitab NiS uuenduslikele süsteemidele, materjalidele või protsessidele, mis on loodud





bioloogiast saadud teadmiste põhjal, võimaldades skaleeritavaid rakendusi arhitektuuris ja inseneriteaduses.

Biomimeetilise disaini rakendamine võimaldab meil vaadelda loodust mitte ainult ilu või inspiratsiooni allikana, vaid ka teadmiste ja innovatsiooni allikana. Looduslike strateegiate arhitektuurilisteks süsteemideks tõlkimise abil saavad disainerid luua hooneid ja infrastruktuure, mis on regeneratiivsed, kohanemisvõimelised ja vastupidavad. Järgmises tabelis on esitatud valitud näited bioloogilistest süsteemidest ja nende vastavatest arhitektuurilistest rakendustest, mis näitavad, kuidas biomimikri kujundab jätkuvalt säästva disaini tulevikku.

Biooloogiline mudel	Looduslik strateegia	Arhitektuuriline/linnaline rakendus	Lahendatud väljakutse	Allikas
Termiidimägi	Passiivne õhuvool reguleerib sisetemperatuuri	Eastgate'i keskus (Zimbabwe)	Energiatõhus kliimaseade	Turner & Soar, 2008
Lootoseleht	Mikro-/nanotekstuur põhjustab vee ja mustuse mahaveeremise	Isepuhastuvad aknad, fassaadid ja päikesepaneelid	Hoolduse vähendamine, vee kokkuhoid	Barthlott & Neinhuis, 1997; Koch jt, 2009
Kaktuse nahk	Ribiline ja vahajas pind suunab kastet ja piirab aurustumist	Veekogumisseinad ja kõrbearhitektuur	Vee kogumine ja säilitamine	You jt, 2012
Namibi kõrbe mardikas	Hüdrofiilsed ja hüdrofoobsed mustrid püüavad niiskust kinni	Udu koguvad pinnad ja katused	Juurdepääs atmosfääri veele	Norgaard jt, 2012
Ämbliku siid	Suur tõmbetugevus ja paindlikkus	Kerged pingekonstruktsioonid, komposiidid	Materjalitõhusus ja vastupidavus	Fratzl ja Barth, 2009
Kärgstruktuur	Geomeetriline efektiivsus minimaalse materjaliga	Kerged paneelid, moodulkonstruktsioon	Tugevus väiksema materjalikuluga	Vincent jt, 2006

Bioinspiratsiooni potentsiaali täielikuks mõistmiseks jätkusuutlikus arhitektuuris on oluline liikuda teoreetilistest põhimõtetest reaalsete rakenduste juurde. Bioloogilised organismid pakuvad mitmekesiseid strateegiaid, mis on välja töötatud miljonite aastate pikkuse kohanemise käigus – meetodeid, mis saavad otseselt mõjutada seda, kuidas me linnakeskkondi kujundame, ehitame ja käitame. Biomimikri kontekstis ei peitu edu looduse välimuse kopeerimises, vaid selle funktsioonide, käitumise ja süsteemide tähendusrikkas ja mõõdetavas ülekandmises inimese disaini.

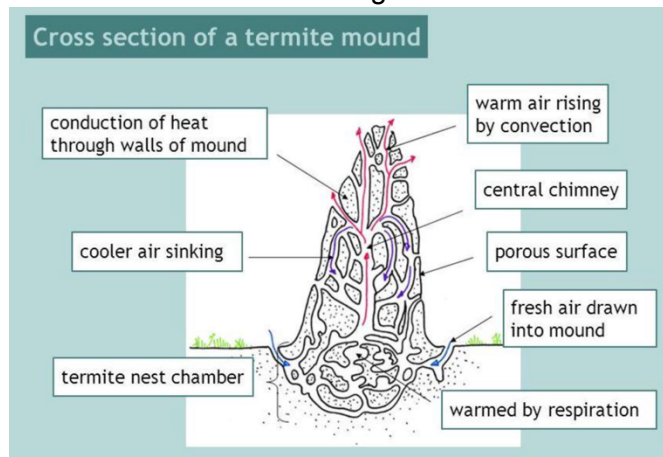


Järgmistes osades tuuakse välja kolm hästi uuritud bioloogilist mudelit – termiidimäed, lootoselehed ja puude/juurte hargnemissüsteemid –, mis on inspireerinud uuenduslikke arhitektuurilisi ja linnalahendusi. Need näited illustreerivad, kuidas bioloogilisi strateegiaid on kohandatud ehitussüsteemidesse, et lahendada selliseid probleeme nagu kliimakontroll, vee säästmine, isehooldus ja ressursside jaotamine. Iga juhtum on otseselt seotud praktilise rakendusega ja seda toetavad teaduslikud uuringud.

Koos järgmise tabeliga pakuvad need juhtumiuuringud aluse bioinspireeritud disaini sügavuse ja mitmekülgse mõistmiseks. Need näitavad, kuidas looduse „disainiõpikust“ õppimine saab luua uuenduslikumaid, vastupidavamaid ja jätkusuutlikumaid inimkeskkondi.

Termiidimäed: passiivne termoregulatsioon ja ventilatsioon

Termiidimäed, eriti need, mille on ehitanud *Makrotermid* Sahara-taguses Aafrikas elavad liigid on keerukad



looduslikud struktuurid, mis säilitavad märkimisväärselt stabiilse sisetemperatuuri ja niiskuse hoolimata äärmuslikest välistingimustest. See saavutatakse keeruka õhušahtide ja tunnelite võrgustiku abil, mis soodustab passiivset ventilatsiooni. Termiidid kasutavad konvektiivse õhuvoolu juhtimiseks kontrollitud avade ja kambrite süsteemi, reguleerides künka sisemist mikrokliimat, et toetada nende sümbiootilist seente vohamist.



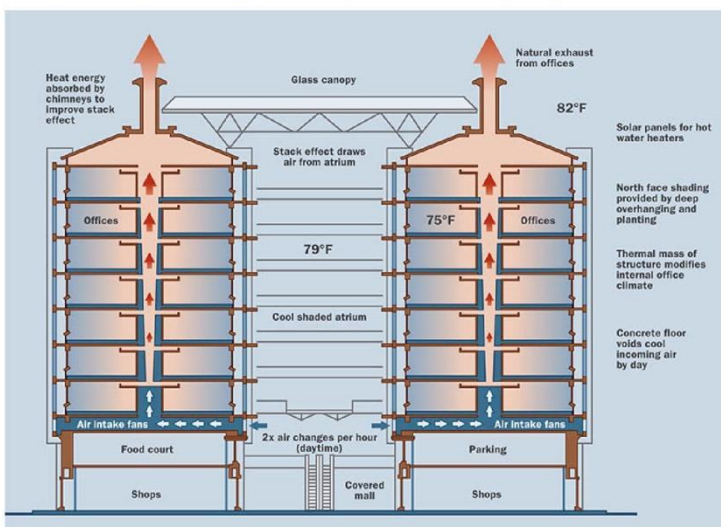
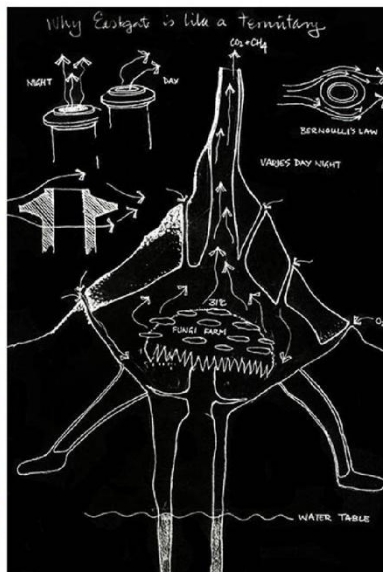


See looduslik
inspireerinud
arendama
hooneid, mis

ilma
süsteemidele
Kõige
on Eastgate'i
Zimbabwe's,
arhitekt Mick

Arup
jälgendab
põhimõtteid,
passiivselt
temperatuuri,
ventilatsiooni

enam kui 90%
suurusega
hoonetega
2008).



model on
arhitekite ja insenere
energiatõhusaid
reguleerivad
sisetemperatuuri
mehaanilistele
suuresti tuginemata.
kuulsam rakendus
keskus Harare'is
mille projekteeris
Pearce koostöös
inseneribürooga
Associates. Hoone
termiidimäe
reguleerides
õhuvoolu ja
vähendades
ja jahutuse
energiatarbimist
võrreldes sarnase
tavapäraste
(Turner & Soar,



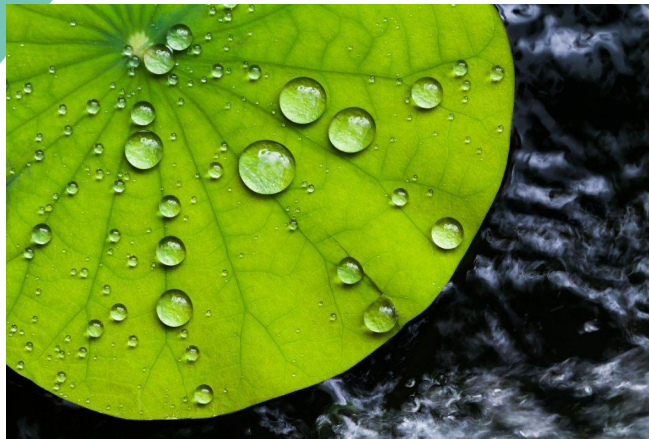


Fig 3. Eastgate Centre in Harare, Zimbabwe, source:
<https://www.mickpearce.com/assets/images/hisemimicry-architecture-09-1400x2133-771.jpg>
INCLUDEPICTURE
"https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/542b0d79e4b0a8c50e8b52a0/fcbf8511-9dd7-4971-8143-710323db0a47/Screen+Shot+2023-05-30+at+10.23.13+AM.png" *
MERGEFORMATINET

Lootosleht: isepuhastuvad pinnad

Lootose taim (*Nelumbo nucifera*) edeneb mudases veekeskkonnas, kuid selle lehed jäävad laitmatult puhtaks. See on tingitud lehtede pinnal olevatest mikro- ja nanostruktuuridest, mis loovad superhüdrofoobse efekti – veepiisad langevad pinnale ja veerevad maha, kogudes ja kandes mustuseosakesi minema. Seda nähtust tuntakse tavaliselt kui "lootoseefekti".

Fig 3. Eastgate Centre in Harare, Zimbabwe, source:
<https://www.mickpearce.com/assets/images/hisemimicry-architecture-09-1400x2133-771.jpg>
INCLUDEPICTURE
"https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/542b0d79e4b0a8c50e8b52a0/fcbf8511-9dd7-4971-8143-710323db0a47/Screen+Shot+2023-05-30+at+10.23.13+AM.png" *
MERGEFORMATINET



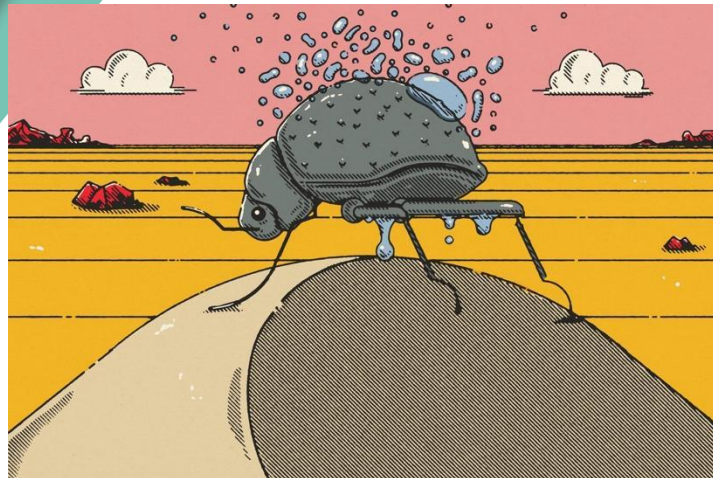
Sellest

arhitektid

akendele,

plaatidele,
vähendades
Need

veetarbimist
elementidele avatud pindade eluiga. See innovatsioon toetab säästvat arhitektuuri,
minimeerides ressursikasutust ja tööjõudu, säilitades samal ajal visuaalse ja funktsionaalse
terviklikkuse.



isepuhastuvast
mehhanismist
inspireerituna on
materjaliteadlased ja
välja töötanud
hüdrofoobsed katted
päikesepaneelidele,
hoonefassaadidele ja
mis tõrjuvad vett,
seeläbi hoolduskulusid.
materjalid vähendavad
puhastamiseks kuluvat
ja pikendavad

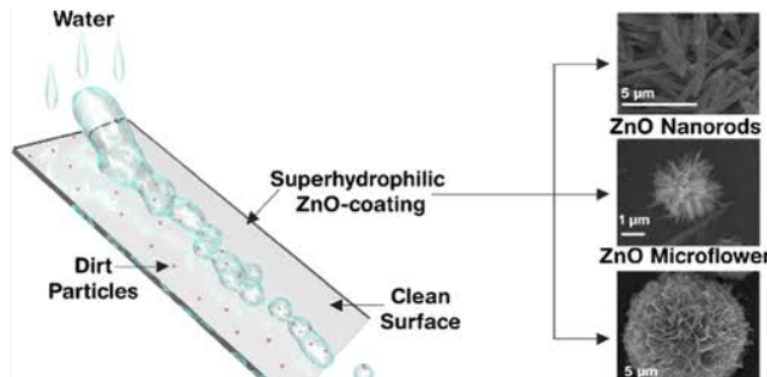


Fig. 5. Superhydrophilic and self-cleaning ZnO-coatings for energy-efficient energy storage. (a) ZnO Nanorods, (b) ZnO Microflower, (c) Microflower. Scale bars: (a) 5 μm, (b) 1 μm, (c) 5 μm.

Namibi kõrbe mardikas: vee kogumine õhust

Namiibi kõrbe mardikas (*Stenocara gracilipes*) elab ühes Maa kuivemas paigas, ammutades vett udust. Tema tiivakatted (elüütra) on tekstuuriga hüdrofiilsete muhkudega, mida ümbritsevad hüdrofoobsed orud, mis võimaldavad tal atmosfääri niiskust püüda ja suhu suunata. Nagu Nørgaard jt (2012) selgitavad, kasutab mardikas erilist udus peesitamise käitumist, suunates oma keha varahommikuse udu ajal tuule poole, et vee kogumist maksimeerida. See passiivne süsteem võimaldab mardikal ellu jääda ilma aktiivse energiakuluta, muutes ta ideaalseks mudeliks säästvate veetehnoloogiate jaoks.





Mardika mikrostruktuuriline pind ja käitumisstrateegia on inspireerinud biomimeetiliste materjalide ja pindade väljatöötamist, mis jäljendavad tema veekogumismeetodit. Insenerid on loonud mustriilise märguvusega sünteetilisi pindu, et kondenseerida ja suunata vett udust, kastest või niiskest õhust. Neid on kasutatud uduvõrkudes, fassaadipaneelides ja katusesüsteemides, eriti veepuuduse käes vaevlevates piirkondades nagu Tšiili, Etioopia ja AÜE. Need süsteemid pakuvad passiivset ja jätkusuutlikku lahendust magevee nappusele kaugetes või põuahtlikes piirkondades, kopeerides mardika efektiivsust.

Arhitektuurilised rakendused arenevad pidevalt, integreerides neid materjale hooneümbristesse, mis pakuvad varju ja toimivad vee kogumise vahenditena, vähendades sõltuvust tsentraliseeritud taristust ja edendades keskkonnakindlust.

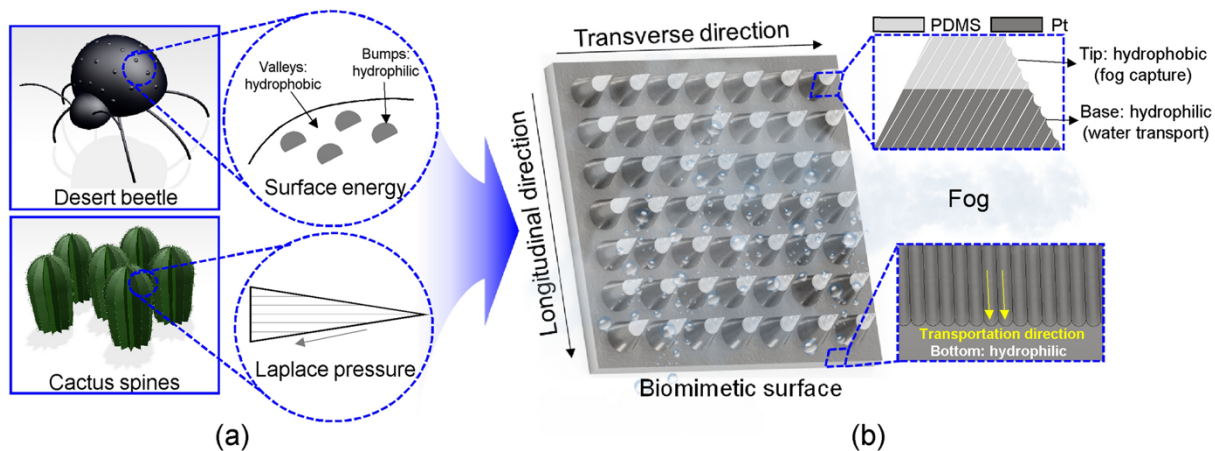


Fig 7. (a) Illustration of the characteristics of both elytra of the Namib Desert beetle and cactus spines; (b) schematic of the hierarchically structured biomimetic surfaces inspired by the elytra of the Namib Desert beetle and cactus spines. Source: <https://www.nature.com/articles/s41598-023-37461-x/figures/1>

Käivita:





Liitreaalsuse rakendamine loodusest inspireeritud disaini uurimiseks STEM-hariduses

Muutuvas STEM-haridusmaastikul pakub bioinspiratsiooni integreerimine ja loodusest disainipõhimõtete ammutamine väga kaasahaaravat teed, mis ühendab õpilasi reaalse maailma jätkusuutlikkuse väljakutsetega. Liitreaalsus (AR) kerkib selles kontekstis esile transformatiivse tööriistana, ületades lõhet abstraktsete bioloogiliste kontseptsioonide ja käegakatsutavate arhitektuuriliste rakenduste vahel 14–18-aastaste keskkooliõpilaste seas.

Hiljutised uuringud rõhutavad, et liitreaalsuse tehnoloogiad parandavad oluliselt õpilaste kaasatust ja süvendavad arusaamist. Liitreaalsuse kaudu saavad õpilased suhelda bioloogiliste struktuuride kolmemõõtmeliste mudelitega, näiteks lootoselehtede mikrostruktuuri või termiidimägede ventilatsioonisüsteemiga, mis on projitseeritud nende füüsilisse keskkonda. See kaasahaarav kogemus aitab õppijatel visualiseerida, manipuleerida ja paremini mõista keerulisi STEM-kontseptsioone (Parimad kolledžid, 2024).

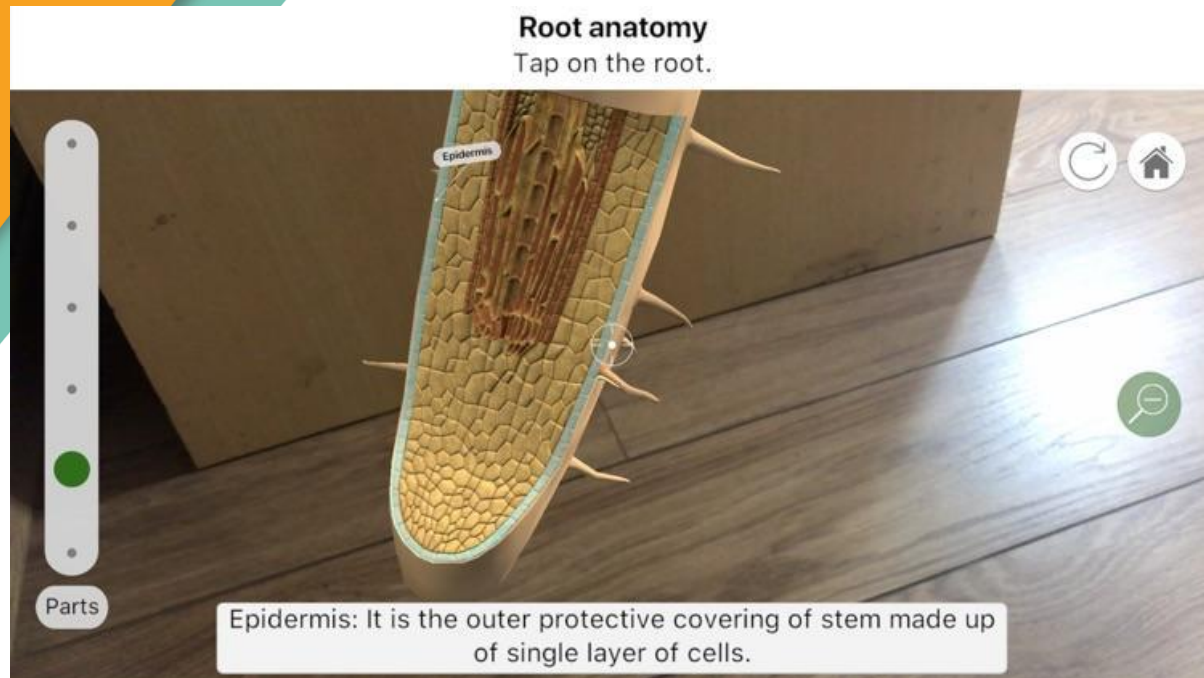
Lisaks toetab liitreaalsus keerukate looduslike süsteemide visualiseerimist, mida traditsiooniliste õppemeetodite abil võib olla keeruline tabada. Bioloogiliselt inspireeritud disainiõppes võimaldab liitreaalsus õpilastel dünaamiliselt uurida, kuidas looduslikud kohandused, nagu kõrbemardikate veekogumismehhanismid või kaktuste naha isevarjutavad omadused, saavad inspireerida arhitektuurilist innovatsiooni. Uuringud on näidanud, et liitreaalsus STEM-kontekstis võib edendada kriitilist mõtlemist, loovust ja ruumilist arutlusvõimet, mis on tulevaste inseneride ja disainerite jaoks olulised oskused. Hariduse piirid, 2024).

Lisaks pakuvad liitreaalsuse tehnoloogiad paindlikkust ja kaasatust, kohandudes erinevate õppimistemperatuuride ja -stiilidega. Õpilased saavad osaleda individuaalselt või koostöös, luues teadmisi vastavalt oma õpieelistustele. Selline paindlikkus aitab kaasa paremale ligipääsetavusele ja õpilaste rahulolule STEM-hariduskeskkondades.

Lõpuks võimaldab liitreaalsuse integreerimine bioinspiratsiooni haridusse õpilastel omandada teoreetilisi teadmisi ja autentseid probleemide lahendamise kogemusi. Biomimeetilise fassaadi kujundamine linna ülekuumenemise vähendamiseks või taimede käitumisel põhineva varjutussüsteemi kontseptualiseerimine annab õpilastele interdistsiplinaarseid oskusi bioloogia, tehnoloogia ja arhitektuuri ristumiskohas. See terviklik lähenemisviis soodustab innovatsiooni, jätkusuutlikkust ja reaalse maailma valmisolekut.

Kokkuvõttes loob AR-tööriistade integreerimine bioinspiratsioonile keskendunud STEM-haridusse dünaamilisi, kaasavaid ja tulevikku suunatud õpikogemusi, mis annavad õpilastele võimaluse loodusest õppides uuendusi teha.





Plantale'i rakendus

Kuna liitreaalsuse (AR) tehnoloogia hariduses üha hoogu kogub, on mitmed koolid ja haridusalgatused juba näidanud selle potentsiaali STEM-õppe edendamiseks bioinspiratsiooni kaudu. Need projektid näitavad, kuidas AR saab kaasata 14–18-aastaseid õpilasi bioloogiliste nähtuste vaatlemisse, looduspõhimõtete mõistmisse ja nende loomingulisse rakendamisse inseneri- ja disainiprobleemide lahendamisel. Järgmised näited illustreerivad, kuidas AR on edukalt integreeritud bioinspireeritud STEM-hariduskeskkondadesse, et edendada sügavamat kaasatust, kontseptuaalset mõistmist ja innovatsioonioskusi.





Faas	Kirjeldus
Ava sta	- Uurimistöö ja avastamine: Uurige bioloogilisi süsteeme (nt termiidimäed, lootoselehed, linnupesad) ja nende olulisust arhitektuuris.
	- Sisu arendamine: töötada välja alusmaterjalid, mis selgitavad, kuidas bioloogilisi funktsioone saab rakendada arhitektuurilistele elementidele (nt ventilatsioon, isolatsioon, konstruktsioon).
	- Vajaduste analüüs: tuvastada teadmiste lüngad ja õppimisvõimalused bioarhitektuuri ja säästva linnaplaneerimise valdkonnas.
Käi vita	- Õppekava rakendamine: viige läbi interdistsiplinaarseid tunde, mis ühendavad bioloogiat ja arhitektuuri (nt kuidas kaktuse nahk mõjutab veekogumispindu).
	- Interaktiivsed harjutused: kaasake õpilasi praktiliste tegevuste ja liitreaalsuse simulatsioonidega, et modelleerida loodusest inspireeritud hooneelemente.
	- Tagasiside kogumine: õppijatelt ja õpetajatelt teadmiste kogumine, et parandada bioloogiliste kontseptsioonide integreerimist disainmõtlemisse.
Täi ust am a	- AR-integratsioon: rakendage AR-i biomimeetiliste hooneelementide visualiseerimiseks ja nendega suhtlemiseks (nt simuleerige õhuvoolu termiitidest inspireeritud ventilatsioonisüsteemides).
	- Interaktiivne õpe: õpilased manipuleerivad 3D-bioloogiliste mudelite ja arhitektuuriliste analoogidega, ühendades looduse ja ehitatud keskkonna.
	Mängustatud sisu: - Punktid ja märgid: teenige preemiaid bioloogiliste strateegiate tuvastamise ja nende arhitektuuriliste lahendustega sidumise eest (nt lootose efekti matkimine fassaadi isepuhastumiseks).
	- Edetabelid: edendage sõbralikku võistlust sellistes ülesannetes nagu looduslike süsteemide sobitamine nende ehitatud vastetega.
	- Ülesanded ja tasemed: Läbi biomimikri väljakutseid, alates bioloogilistest põhimõistetest kuni keerukate disainirakendusteni.
	- Avastamise preemiad: avasta loomade elupaikade või taimede struktuuride liitreaalsusmudelites peidetud arhitektuurilisi strateegiaid.
	- Koostöös mängustatud ülesanded: töötage meeskondades loodusest inspireeritud linnapiirkondade kujundamiseks, kasutades liitreaalsust keskkonnamõju ja energiatõhususe simuleerimiseks.
	AR-põhised hinnangud: - Kasutage liitreaalsust arusaamise hindamiseks, lastes õpilastel demonstreerida bioloogilise põhimõtte (nt kärgstruktuuri) tõlkimist ehitusdetailiks (nt moodulseinasüsteemid).





Viide

Aamer, H. S., Hamza, A. F., Khairy, M. ja Ghonimi, I. (2020). Biomimikri kui jätkusuutliku disaini meetoodika hoonete käitumise hindamiseks. *Engineering Research Journal*, 46(1), 191–201.

Bader, F., Halabi dotsent, M., Mohsen dotsent, H. ja Youssef dotsent, M. (2021). BIOMIMIKRILIST DISAINILÄHENEMISVIISI KASUTAMINE JÄTKUSUUTLIKE JA ELASVASTE KONSTRUKTSIOONIDE EHITAMISEL (JUHTUMIUURING: BEIRUTI SADAM). *BAU Journal-Creative Sustain. Dev.* 2 (2). doi:10.54729/2789-8334.1041

Badarnah, L. (2017). Vorm järgib keskkonda: biomimeetilised lähenemisviisid hoone väliskesta projekteerimisel keskkonnamõjude arvestamiseks. *Hooned*, 10(4), 42.

Bar-Cohen, Y. (2012). *Biomimeetika: looduspõhine innovatsioon*. CRC Press.

Barthlott, W. ja Neinhuis, C. (1997). Püha lootose puhtus ehk pääsemine saastumisest bioloogilistel pindadel. *Planta*, 202(1), 1–8.

Benyus, J. M. (1997). *Biomimikri: loodusest inspireeritud innovatsioon* Harperi püsik.

BestColleges. (2024). Liitreaalsuse roll STEM-hariduse täiustamisel. *India Today*. <https://bestcolleges.indiatoday.in/news-detail/the-role-of-augmented-reality-in-enhancing-stem-education>.

Chayaamor-Heil, N. (2023). Bioinspiratsioonist biomimikrini arhitektuuris: võimalused ja väljakutsed. *Entsüklopeedia* 3 (1), 202–223. doi:10.3390/encyclopedia3010014

Calabrese, E. (2015). Biofiilse disaini praktika heaolu saavutamise vaateprojekt. Saadaval aadressil: <https://www.researchgate.net/publication/321959928>.

Dicks H, Bertrand-Krajewski J-L, Ménézo C, Rahbe Y, Pierron J ja Harpet C 2021 Biomimikri rakendamine linnades: mets kui linnaplaneerimise ja -disaini mudel lk 271–88.

Dixit, S. ja Stefańska, A. (2023). Bioloogia: ülevaade biomimeetilisest rakendusest arhitektuuri- ja konstruktsioonide projekteerimisel. *Ain Shams Eng. J.* 14 (1), 101822. *Ain Shamsi Ülikool*, 1. veebruar. doi:10.1016/j.asej.2022.101822

Ferwati, M. S., Alsuwaidi, M., Shafaghat, A. ja Keyvanfar, A. (2019). Biomimikri rakendamine linnametamorfoosis jätkusuutlikkuse saavutamiseks: juhtumiuuringud. *Archit. City Environ.* 14 (40), 133–162. doi:10.5821/ace.14.40.6460

Fratzl, P. ja Barth, F. G. (2009). Biomaterjalist süsteemid mehhaniseerimiseks ja aktiveerimiseks. *Nature*, 462(7272), 442–448.





Hariduse piirid. (2024). Liitreaalsus STEM-hariduses: eelised, väljakutsed ja tulevased uurimissuunad.

<https://www.frontiersin.org/journals/education/articles/10.3389/feduc.2024.1391803/full>

IUCN (2020b). Juhend IUCN-i globaalse standardi kasutamiseks looduspõhiste lahenduste puhul. 1. Gland, Šveits: IUCN. IUCN, Rahvusvaheline Looduskaitseliit. doi:10.2305/IUCN.CH.2020.09.en

Jamei, E. ja Vrcelj, Z. (2021). Biomimikri ja ehitatud keskkond: õppimine looduse lahendustest. Appl. Sci. Switz. 11 (16), 7514. MDPI AG, 2. august. doi:10.3390/app11167514

Jain A, Cummings A, Lim G S, Shah I, Haan L, Teo L, Fadnavis M, Toh M M, Hays N, Dhuri R ja Swaminathan S 2023 Biomimikri troopiliste hoonete fassaadide jaoks: disaini tööriistakomplekt soojusmugavuse haldamiseks looduse geeniuse abil (Singapur: bioSEA Pte. Ltd.)

Judith Oginga, M. (2022). Linnade tuleviku visioonid. New York: ÜRO väljaanne.

Ju, J., Bai, H., Zheng, Y., Zhao, T., Fang, R. ja Jiang, L. (2012). Multistruktuuriline ja multifunktsionaalne integreeritud udukogumissüsteem kaktuses. Loodustead , 3 , 1247 .

Kennedy, E., Fechey-Lippens, D., Hsiung, B.-K., Niewiarowski, P. H. ja Kolodziej, M. (2015). Biomimikri: tee jätkusuutliku innovatsioonini. *Disainiprobleemid*, 31(3), 66–73.

Koch, K., Bhushan, B. ja Barthlott, W. (2009). Taimede multifunktsionaalsed pinnastruktuurid: inspiratsiooniallikas biomimeetikale. *Progress in Materials Science*, 54(2), 137–178.

Landrum, N. E. ja Mead, T. (2022). Jätkusuutlikkus biomassis* Singapur. Springer, 1–15. doi:10.1007/978-981-19-1812-4_1/KAAS

Matthews, J., Ocampo, E. ja Cruz, D. (2022). Looduspõhiste lahenduste integreerimine kliimamuutustega kohanemiseks ja katastroofiohu maandamiseks: praktiku juhend.

Madmar. S, Zaly Saleh. M, Ak Mattusin. A.M.R, Ilhan. A.A. (2023). Biomimikri rakendused linnaplaneerimises: uuritakse uute lähenemisviiside olulisust linnade kujundamisel, ammutades inspiratsiooni loodusest. IOP konverentside sari: Maa ja keskkonnateadus, doi:10.1088/1755-1315/1274/1/012015

Nørgaard, T., Dacke, M. ja Warrant, E. J. (2012). Namiibi kõrbe mardikate udus peesitamise käitumine ja vee kogumise efektiivsus. *Frontiers in Zoology*, 9, 9. <https://doi.org/10.1186/1742-9994-9-9>.





Oguntona, O. A. ja Aigbavboa, C. O. (2023a). Looduse inspiratsioon, jälgendamine ja emuleerimine: biomimikri mõtteviis jätkusuutlikkuse saavutamiseks ehitustööstuses. *Esikülg. Built Environ.* 9, 1085979. doi:10.3389/fbuil.2023.1085979

Oguntona, O. A. ja Aigbavboa, C. O. (2023b). Looduse inspiratsioon, jälgendamine ja emuleerimine: biomimikri mõtteviis jätkusuutlikkuse saavutamiseks ehitustööstuses. *Esikülg. Ehitatud keskkond.* 9. doi:10.3389/fbuil.2023.1085979.

Othmani, N. I., Mohamed, S. A., Abdul Hamid, N. H., Ramlee, N., Yeo, L. B. ja Mohd Yunus, M. Y. (2022). Biomimikri disaini juhtumiuuringute ülevaade säästva disaini lahendusena. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 29 (46), 69327–69340. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. doi:10.1007/s11356-022-22342-z.

Sowińska-Świerkosz, B. ja García, J. (2022). Mis on looduspõhised lahendused (Looduspõhised lahendused)? Põhiideede seadmine kontseptsiooni selgitamiseks. *Nature-Based Solutions* 2, 100009. doi:10.1016/j.nbsj.2022.100009

Turner, J. S. ja Soar, R. C. (2008). Biomimikriast kaugemale: mida termiidid saavad meile õelda elava hoone loomise kohta. Esimene rahvusvaheline konverents industrialiseeritud ja intelligentse ehituse teemal.

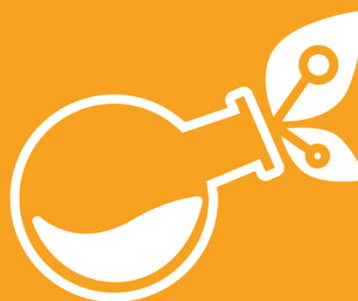
Urdinola-Serna, D. ja Diseño, B. (2018). Esimene trükk, 2018. Projekt: Bioloogiliselt inspireeritud pindade ja tekstuuride repertuaar digitaalse valmistamistehnoloogia abil tehtud morfoloogiliste eksperimentide kaudu. Failinumber 601B-05/16-35. Saadaval aadressil: <https://www.upb.edu.co>.

Vincent, J. F. V., Bogatyreva, O. A., Bogatyrev, N. R., Bowyer, A. ja Pahl, A.-K. (2006). Biomimeetika: praktika ja teooria. *Kuningliku Seltsi ajakiri Interface*, 3(9), 471–482.





Co-funded by
the European Union



BIOS4YOU AR 2.0

BIO-INSPIRED STEM TOPICS FOR ENGAGING YOUNG GENERATIONS
THANKS TO THE USE OF AUGMENTED REALITY



Project Number: KA220-BW-23-30-126516

Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.