ET4 Digital

KURSUS 1



Digitehnoloogiad **ehituses** ja **renoveerimises**

Kaasrahastanud Euroopa Liit

Rahastatud Euroopa Liidu poolt. Avaldatud seisukohad ja arvamused on ainult autori(te) omad ega pruugi kajastada Euroopa Liidu või Euroopa Hariduse ja Kultuuri Rakendusameti (EACEA) seisukohti ja arvamusi. Euroopa Liit ega EACEA nende eest ei vastuta.

1. kursus.
Digitehnoloogiad ehituses ja renoveerimises (IoT, sensorid, AR/VR)

1. teema. Nutikad ehitusobjektid: asjade interneti (IoT) ja sensorite rakendamine ehitusprotsessides
2. teema. AR (liitreaalsus) ja VR (virtuaalreaalsus) ohutumaks ja tõhusamaks renoveerimiseks

Sisukord

1.teema. Nutikad ehitusobjektid: asjade interneti (IoT) ja sensorite rakendamine ehitusprotsessides

Õpieesmärgid 5
Õpiväljundid 5
Sõnastik 6

1. Lühike sissejuhatus 1. teemasse 7

2. Asjade interneti (IoT) põhimõistete ülevaade 7

2.1 Asjade interneti (IoT) põhimõisted ehituses 7
2.2 Peamised eelised ehitusobjektil 9
2.3 Olulisus nutika ülemineku seisukohast 11
2.4 Põhisõnum VKE-dele 11

3. Sensorite tüübid: nutika ehitusobjekti „meeled“ 11

3.1 Keskkonnasensorid: ümbritsevate tingimuste jälgimine 11
3.2 Konstruktsiooni seisundiseire sensorid: hoone seisukorra jälgimine 13
3.3 Energia- ja ressursikasutuse seire: raiskamise vähendamine 14
3.4 Ohutussensorid ja nutikad isikukaitsevahendid (IKV): töötajate ohutuse tagamine 14

4. Andmete kogumine ja reaalajas seiresüsteemid 16

4.1 Andmesidesild (signaalist andmeteks) 16
4.2 Andmepunkti teekond (samm-sammult) 16
4.3 Seiresüsteemide peamised komponendid 16
4.4 Reaalajas otsuste tegemine: miks kiire reageerimine on oluline 17
4.5 Seos digikaksikuga (lühitutvustus) 17

5. Juhtumiuuring: RINNO renoveerimisprojekt 17

5.1 Projekti kontekst 17
5.2 Kuidas asjade interneti (IoT) sensorid toetasid renoveerimist 18
5.3 Peamised õppetunnid VKE-dele 18

6. Praktilised sammud VKE-dele lihtsa sensortehnoloogia kasutuselevõtuks 19

6.1 1. samm: tuvasta kitsaskoht (ehk miks?) 19
6.2 2. samm: vali sobiv ühenduvus (ehk kuidas?) 19
6.3 3. samm: alusta stardikomplektiga 20
6.4 4. samm: kasuta lihtsat ja kiiret paigaldust („paigalda ja jälgi“-lähenemine) 20
6.5 5. samm: arenda töötajate oskusi (Hoia asi lihtsana!) 20
6.6 Eetika, privaatsus- ja küberturvalisuse aspektid 21

7. Valikvastustega küsimused 21

8. Kasutatud kirjandus 24

Teema 2: AR ja VR ohutumaks ja tõhusamaks renoveerimiseks

Õpieesmärgid 25
Õpiväljundid 25
Sõnastik 25

1. Sissejuhatus 26

1.1 Kommunikatsiooni areng ehitusobjektil 26
1.2 Usalduslõhe (*trust gap*) ja kognitiivse koormuse vähendamine 27
1.3 Kättesaadavus VKE-dele 27

2. Digireaalsuse spekter 27

2.1 Kaks peamist modaalsust 28
2.2 Toimemehhanism: kuidas mobiilne liitreaalsus (AR) tajub reaalsust 28
2.3 VKE-de tänapäevane riistvaramaastik 28

3. Virtuaalreaalsus (VR) ohutuskoolituses 29

4. Projekti läbivaatus ja ehitusplatsi koordineerimine 30

4.1 Virtuaalne ringkäik (visuaalne ruumiesitlus) 30
4.2 „Näe-mida-mina-näen“ (SWIS) – kaugjuhendamine 30
4.3 „Röntgennägemine“ konfliktide tuvastamisel (*clash detection*) ..... **Error! Bookmark not defined.**
4.4 Tööetapi lõppkontroll: digitaalne teostusjärgne kontroll 32

5. Investeeringutasuvus (ROI) ja tasuvusanalüüs 32

6. Kasutuselevõtu väljakutsed VKE-dele 33

7. Praktilised juhtumiuuringud 34

1. juhtumiuuring: iteratiivne ruumiline ümberkujundamine (liitreaalsuse (AR) rakendus) 34
2. juhtumiuuring: 4D-ehitusgraafiku visualiseerimine (virtuaalreaalsuse (VR) rakendamine) 34
3. juhtumiuuring: intsidendijärgne ohutuspaus virtuaalreaalsuse abil 35

8. Ülesanded: mooduli hindamine 36

9. Kasutatud kirjandus 38

1.teema. Nutikad ehitusobjektid:asjade interneti (IoT) ja sensorite rakendamine ehitusprotsessides

Õpieesmärgid. Õpiväljundid. Sõnastik.

Õpieesmärgid

Selles osas tutvustatakse asjade interneti (Internet of Things, IoT) põhimõisteid ja selgitatakse selle praktilist kasu väikestele ja keskmise suurusega ettevõtetele (VKE-dele). Ehitusobjektil kasutatavat asjade internetti (IoT) saab käsitleda neljakihilise arhitektuuri kaudu. Asjade internet (IoT) pakub VKE-dele pelga uudsuse asemel praktilist kasu ning selle kasutuselevõtt ei pea olema kallis ega keeruline.

Õpiväljundid

- selgitab ehitusobjektidel kasutatava neljakihilise asjade interneti (IoT) arhitektuuri;
- eristab sensorikategooriaid ja seostab need ohutus-, kvaliteedi- ja ressursiriskidega;
- kirjeldab andmete liikumist sensorist lüüsiseadmesse, pilveteenusesse ja edasi juhtpaneelil kuvatava hoiatuseni;
- näitab, kuidas digikaksikutes ja ehitusinfo modelleerimises (BIM) seostatakse reaalajas sensoriandmevood hoonehaldusega;
- kasutab RINNO (ELi rahastatud renoveerimisprojekt) juhtumiuuringut tõendite ja tulemuste tõlgendamiseks;
- käsitleb töötajakesksete lahenduste kasutuselevõtuga seotud eetika- ja turvanõudeid;
- põhjendab investeeringutasuvuse (ROI) abil asjade interneti (IoT) kasutuselevõttu ja laiendamist VKE-des.

Sõnastik

IEQ - sisekeskkonna kvaliteet (*Indoor Environmental Quality*):	hõlmab CO_2-taset, õhuniiskust, temperatuuri ja õhukvaliteeti.
IoT -asjade internet (*Internet of Things*) :	asjade internet on omavahel ühendatud sensorite ja seadmete võrk, mis kogub ja jagab andmeid.
BIM - ehitusinfo modelleerimine (*Building Information Modelling*):	hoone või rajatise andmerikas 3D-mudel.
Digikaksik *(Digital Twin)*:	sensoriandmete ja käitusseisundiga sünkroniseeritud, reaalajas ajakohastuv BIM-mudel.
LoRaWan - madala energiatarbega ja laia levialaga traadita võrguprotokoll (*Long Range Wide-Area Network*):	madala energiatarbega laivõrk (Long Range Wide-Area Network, LoRaWAN), mis sobib väikese andmemahuga andmete edastamiseks pikkade vahemaade taha.
NB-IoT - kitsasriba-esemevõrk (*Narrowband Internet of Things*):	madala energiatarbega mobiilsideühendus, mis tagab leviala sügaval hoonete sees.
Lüüsiseade (*gateway*):	servaseade, mis koondab sensorite signaalid ja edastab andmed pilve.
Geotara (*geofence*):	virtuaalne piir, mille ületamisel käivitub hoiatus.
IKV - isikukaitsevahendid, (*Personal Protective Equipment*, PPE):	sensorite või ühenduvusega täiustatud isikukaitsevahendid.
Servtöötlus *(Edge computing)*:	andmete töötlemine sensori lähedal, et vähendada latentsust ja ribalaiuse kasutust.
ROI - Investeeringutasuvus (*Return on Investment*):	saadud väärtuse ja tehtud kulude suhe.
Betooni küpsus *(Concrete maturity)*:	betooni temperatuuri, aja ja tugevuse kasvu vaheline seos.
Täitur *(Actuator)*:	seade, mis teeb sensoriandmete põhjal füüsilise toimingu.
Stardikomplekt *(Starter kit)*:	lüüsiseade, väike sensorikomplekt ja eelkonfigureeritud juhtpaneel pilootprojekti kiireks käivitamiseks.
RFID *(Radio-Frequency Identification)*	Raadiosagedustuvastus: tehnoloogia, mis kasutab elektromagnetvälju objektidele kinnitatud märgiste tuvastamiseks ja jälgimiseks.
RINNO	ELi rahastatud programmi „Horisont 2020“ renoveerimisprojekt, mis keskendub elamute terviklikule energiatõhususe parandamisele kogu Euroopas.
VKE	Väike- ja keskmise suurusega ettevõte (VKE (*Small and Medium-sized Enterprise,* SME): Euroopa Komisjoni määratluse järgi vähem kui 250 töötajaga ettevõte.

1. Lühike sissejuhatus 1. teemasse

Asjade interneti (IoT) lõimimine loob olulise silla ehitusobjekti füüsilise tegelikkuse ja tänapäevaseks projektijuhtimiseks vajaliku digitaalse seire vahel. Kui traditsioonilised meetodid tuginevad staatilistele plaanidele ja ebaregulaarsele käsitsi aruandlusele, siis asjade internet muudab neid protsesse, andes dünaamilise reaalajavaate ehitusobjekti tegelikust olukorrast ning muutes senise „pimesi“ tegutsemise läbipaistvaks ja andmepõhiseks.

Moodulis uuritakse, kuidas sensorkihist, võrgukihist, andmetöötluskihist ja rakenduskihist koosnev neljakihiline arhitektuur võimaldab VKE-del liikuda pelgast uudsusest edasi ning saavutada mõõdetavaid parendusi ohutuses, ressursside jälgimises ja kvaliteedikontrollis. Kasutades vastupidavaid sensoreid, mis jälgivad nii betooni küpsust ja konstruktsioonide seisukorda kui ka töötajate väsimust ja keskkonnanõuete täitmist, saavad ettevõtted vähendada ebakindlust, mis põhjustab sageli kulukaid ümbertegemisi ja ajakavast mahajäämist.

Nagu näitab RINNO juhtumiuuring, seisneb asjade interneti (IoT) väärtus võimaluses varakult tuvastada varjatud riske, kaitsta töötajaid automaatsete hoiatuste abil ning pakkuda kontrollitavat tõendusmaterjali tulemuslikkuse kohta. Lõppkokkuvõttes esitatakse moodulis praktiline väikeste sammudega alustamise strateegia, mille abil saavad VKE-d võtta kasutusele kulutõhusaid stardikomplekte ja laiendada oma digivõimekust selgelt tõendatud investeeringutasuvuse (ROI) alusel. Nii on üleminek nutikale ehitusobjektile hallatav ja majanduslikult jätkusuutlik.

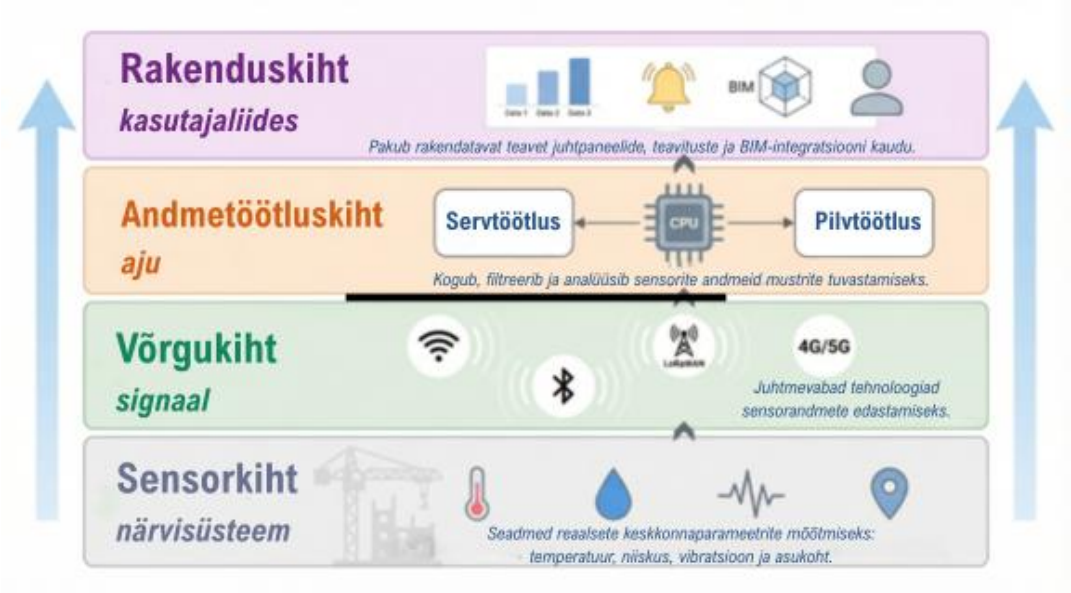
⚠️ MIKS SEE ON OLULINE? Asjade internet (IoT) muudab staatilise BIM-mudeli ehitusobjekti reaalajas ajakohastuvaks digikaksikuks.

VKE-dele: kasutuselevõtt ei eelda kogu ehitusobjekti kohest automatiseerimist. Üks hästi valitud katseprojekt võib anda mõõdetava investeeringutasuvuse juba mõne nädalaga.

2. Asjade interneti (IoT) põhimõistete ülevaade

2.1 Asjade interneti (IoT) põhimõisted ehituses

Ehitusobjektil kasutatavat asjade internetti (IoT) saab käsitleda neljakihilise arhitektuuri kaudu. Igal kihil on kindel roll – alates andmete kogumisest objektil kuni otsuste tegemiseni kontoris. Joonis 1 annab visuaalse ülevaate sellest, kuidas kihid koos toimivad ja moodustavad ehitusobjekti nn „aju“.



Joonis 1. Neljakihiline IoT-arhitektuur: üleminek füüsilisest andmete kogumisest digitaalse rakenduskihini.
Allikas: autori illustratsioon, loodud tehisintellektil põhineva pildigeneraatori (PaperBanana) abil.

2.1.1 Sensorkiht („närvisüsteem“)

Sensorkiht koosneb füüsilistest seadmetest, mis koguvad andmeid reaalsest keskkonnast. Seadmed paigaldatakse tavaliselt masinatele või muudele seadmetele, neid kannavad töötajad või need integreeritakse materjalidesse. Sensorid mõõdavad selliseid parameetreid nagu temperatuur, niiskus, vibratsioon, asend, liikumine ja koormus.

- Keskkonnasensorid: temperatuuri, niiskuse, tolmu ja müra mõõtmiseks ning nõuetele vastavuse ja mugavustingimuste seireks;
- Seadmesensorid: vibratsiooni, mootori temperatuuri, kütusetaseme ning kraanade ja ekskavaatorite koormuse seireks;
- Töötajate kantavad seadmed: südamelöögisageduse ja väsimusnäitajate seireks, liikumise jälgimiseks ning kukkumise tuvastamiseks; need seadmed on integreeritud kiivritesse või vestidesse;
- Materjalisensorid: betooni sisse paigaldatud sensorid kivinemistemperatuuri ja tugevuse arengu jälgimiseks;
- Täiturid: andmete põhjal toimingute tegemiseks, näiteks häire käivitamiseks, seadmete väljalülitamiseks või ventilatsiooniavade avamiseks.

Ehituses peavad sensorid olema vastupidavad, täpsed ja sobima karmidesse keskkonnatingimustesse. Aku kestvus, kalibreerimine ja paigalduskoht on olulised valikud, sest need mõjutavad otseselt sensorite töökindlust ja andmete kvaliteeti.

2.1.2 Võrgukiht (signaal)

Võrgukiht edastab andmed sensoritest andmetöötlussüsteemidesse. Ehitusobjektid on sageli suured, nende paigutus muutub pidevalt ja püsiinfrastruktuur on piiratud, mistõttu kasutatakse laialdaselt traadita tehnoloogiaid.

- Wi-Fi: suure läbilaskevõimega ühendus, mis sobib objektikontoritesse ja ajutistesse soojakutesse, kuid mille leviala on välitingimustes piiratud;

- Bluetooth ja BLE (*Bluetooth Low Energy*): väikese energiatarbega lähiside, mis sobib siseruumides asukoha määramiseks ja kantavates seadmetes kasutamiseks;
- LPWAN (väikevõimsuslik laivõrk; nt LoRaWAN): madala energiatarbega suure levialaga side, mis sobib suurtele väliobjektidele ja hõredatele sensorvõrkudele;
- Mobiilside (4G/5G): suure leviala ja andmeedastuskiirusega, kuid kõrgemate kasutuskuludega;
- Silmusvõrk (*mesh*-võrk): sensorid edastavad andmeid üksteise kaudu, laiendades keeruka ehitusobjekti leviala.

Võrgutehnoloogia valik sõltub ehitusobjekti suurusest, elektrivarustuse kättesaadavusest, andmemahtudest ja eelarvest. Tavaliselt kasutatakse hübriidlahendust, näiteks LoRaWAN-i väikese andmemahuga sensorite jaoks ja Wi-Fi-t suurt andmemahtu nõudvaks seadmete seireks.

2.1.3 Andmetöötluskiht (aju)

See kiht kogub, filtreerib ja analüüsib andmeid. Sensoritelt saadud toorandmed sisaldavad sageli mõõtemüra ja saabuvad pideva andmevoona, mistõttu tuleb neid tähenduslike mustrite tuvastamiseks töödelda. Levinud on kaks lähenemisviisi:

- pilvtöötlus (*cloud computing*): andmed saadetakse pilveserveritesse salvestamiseks, analüüsimiseks ja integreerimiseks planeerimistööriistadega;
- servtöötlus (*edge computing*): andmeid töödeldakse seadmes kohapeal või lähedal asuvas lüüsiseadmes, et vähendada latentsust ja ribalaiuse kasutust.

Servtöötlus sobib ajakriitiliste ohuhäirete korral, samas kui pilveanalüüs sobib pikaajaliste suundumuste analüüsiks, aruandluseks ja planeerimiseks. Ehituses kasutatakse sageli serv- ja pilvlahendust kombineeritult.

2.1.4 Rakenduskiht (kasutajaliides)

Rakenduskiht kuvab andmeid kasutajatele ja teistele süsteemidele. See võib hõlmata näiteks juhtpaneele, mobiilihoiatusi ja reaalajas uuendusi ehitusinfo mudelis (BIM). Eesmärk on edastada tegevuseks vajalikku infot, mitte ainult toorandmeid.

- Juhtpaneelid: seadmete hetkeoleku, töötajate asukoha ja ehitusobjekti tingimuste kuvamine;
- Teavitused: ohtude, seadmerikete või ajakavaga seotud riskide kohta SMS- või rakendusteavituste saatmine;
- BIM-integratsioon: reaalajas sensoriandmete kuvamine digimudelitele paigutatud ülekattena, et toetada visuaalsel infol põhinevat otsustamist;
- Aruanded: automatiseeritud päevalogide ja nõuetele vastavust tõendavate dokumentide koostamine auditite jaoks.

Hästi kavandatud kasutajaliides paneb rõhku selgusele ja info prioriseerimisele ning tagab, et objektijuhid saavad kiiresti tegutseda, ilma et andmete hulk neid üle koormaks.

2.2 Peamised eelised ehitusobjektil

Asjade interneti (IoT) väärtus VKE-dele ei seisne mitte tehnoloogia uudsuses, vaid selle abil saavutatavates praktilistes parendustes. Kõige olulisemad eelised aitavad lahendada ehitusvaldkonna tavapäraseid kitsaskohti, mis on seotud ohutuse, jälgimise, kvaliteedikontrolli ja tõhususega.

2.2.1 Tõhustatud ohutus (peamine prioriteet)

Asjade interneti (IoT) kasutuselevõtu kõige olulisem ajend on ohutus. See võimaldab pidevat seiret ja kiireid teavitusi, vähendades õnnetusjuhtumite arvu ja parandades nõuetele vastavust.

- Digitaalne geotarastus (*geofencing*): loob ohtlike alade ümber virtuaalsed ohutsoonid ja hoiatab töötajaid piirangutsooni sisenemisel;
- Kantav seiretehnoloogia: nutikiivrid või -vestid tuvastavad kukkumisi, väsimust või tervisenäitajate kõrvalekaldeid ning teavitavad sellest kohe objektijuhti;
- Lähedusteavitused: rasketehnika sensorid hoiatavad võimaliku kokkupõrke eest nii masinaoperaatoreid kui ka läheduses viibivaid jalakäijaid;
- Keskkonnaseire: tolmu-, gaasi- või mürasensorid käivitavad häiresignaali enne, kui tingimused muutuvad ohtlikuks.

Peamine kasu on kiirem reageerimine ja väiksem vajadus käsitsi tehtava järelevalve järele. See on eriti kasulik suure töökoormusega või mitme töövõtjaga ehitusobjektidel, kus ülevaade toimuvast on piiratud.

2.2.2 Ressursside ja varade reaalajas jälgimine

Ehitusobjektidel kaotatakse sageli aega ja raha, kuna tööriistad, materjalid ja seadmed on vales kohas või alakasutatud. Asjade internet (IoT) võimaldab varade reaalajas jälgimist ja kasutuse seiret.

- GPS- ja RFID-jälgimine: võimaldab tuvastada hinnaliste varade, näiteks generaatorite, ekskavaatorite või materjalide kaubaaluste asukoha;
- Varude ülevaade: näitab, millised materjalid on ehitusobjektil ja kus neid hoitakse;
- Kasutuse jälgimine: eristab aega, mil mootor töötab, seadme tootlikust tööajast, et vähendada tarbetuid rendikulusid;
- Varguste ennetamine: edastab liikumis- või asukohateavituse, kui vara liigub väljapoole lubatud tsooni.

Need võimalused annavad VKE-dele parema kontrolli rahavoogude üle ja aitavad vältida ressursside puudumisest põhjustatud kulukaid viivitusi.

2.2.3 Kvaliteedikontroll ja konstruktsiooni seisukord

Asjade internet (IoT) parandab ehituskvaliteeti, võimaldades pidevat ja märkamatult toimivat seiret, mida traditsiooniline kontroll ei suuda tagada.

- Betooni küpsuse sensorid: mõõdavad betooni sisetemperatuuri ja tugevuse arengut, et optimeerida raketise eemaldamise aega;
- Konstruktsiooni seisundiseire sensorid: jälgivad vibratsiooni, kallet ja deformatsiooni ajutistes konstruktsioonides, näiteks tellingutel;
- Keskkonnatingimuste stabiilsus: niiskuse ja temperatuuri seire rangelt kontrollitud tingimusi nõudvate viimistlustööde, näiteks pinnakatete paigaldamise korral.

Reaalajas andmete kasutamine aitab projektimeeskondadel vähendada tööde ümbertegemist ning vältida järgmise tööetapi ennatlikku või ohtlikku alustamist.

2.2.4 Töö tõhusus ja kulude vähendamine

Asjade internet (IoT) automatiseerib tavapärast andmekogumist ja võimaldab teha andmetel põhinevaid prognoose, mis aitavad suurendada tootlikkust ja vähendada kulusid.

- Automatiseeritud aruandlus: sensorite logid asendavad igapäevased käsitsi koostatavad aruanded, säästes järelevalvele kuluvat aega;
- Ennetav hooldus: vibratsiooni- või temperatuurinäitude kõrvalekallete põhjal saab prognoosida seadmete rikkeid enne nende tekkimist;
- Ajakava optimeerimine: reaalajas edenemisandmed aitavad varakult tuvastada viivitusi ning võimaldavad tööjõudu ja seadmeid ümber paigutada;
- Energiahaldus: kütusekulu ja tühikäiguaega jälgides saab vähendada raiskamist;

Need eelised on eriti väärtuslikud väikese töötajaskonnaga VKE-dele, kes saavad endale seisakuid vaid piiratud määral lubada.

2.3 Olulisus nutika ülemineku seisukohast

Asjade internet (IoT) on sillaks füüsilise ehitusobjekti ja digimaailma vahel. Ilma IoT lahendusteta on digitaalne mudel, näiteks BIM, staatiline ning kirjeldab üksnes kavandatud olukorda. Asjade interneti (IoT) abil muutub mudel dünaamiliseks ja kajastab ehitusobjekti hetkeolukorda reaalajas. Selline läbipaistvus vähendab ebakindlust ja suurendab usaldust andmepõhiste otsuste vastu.

2.4 Põhisõnum VKE-dele

Asjade interneti (IoT) kasutuselevõtt ei eelda kogu ehitusobjekti automatiseerimist kohe algusest peale. Praktiline viis on alustada ühest suure väärtusega kasutusjuhust ja laiendada kasutuselevõttu mõõdetava investeeringutasuvuse (ROI) põhjal.

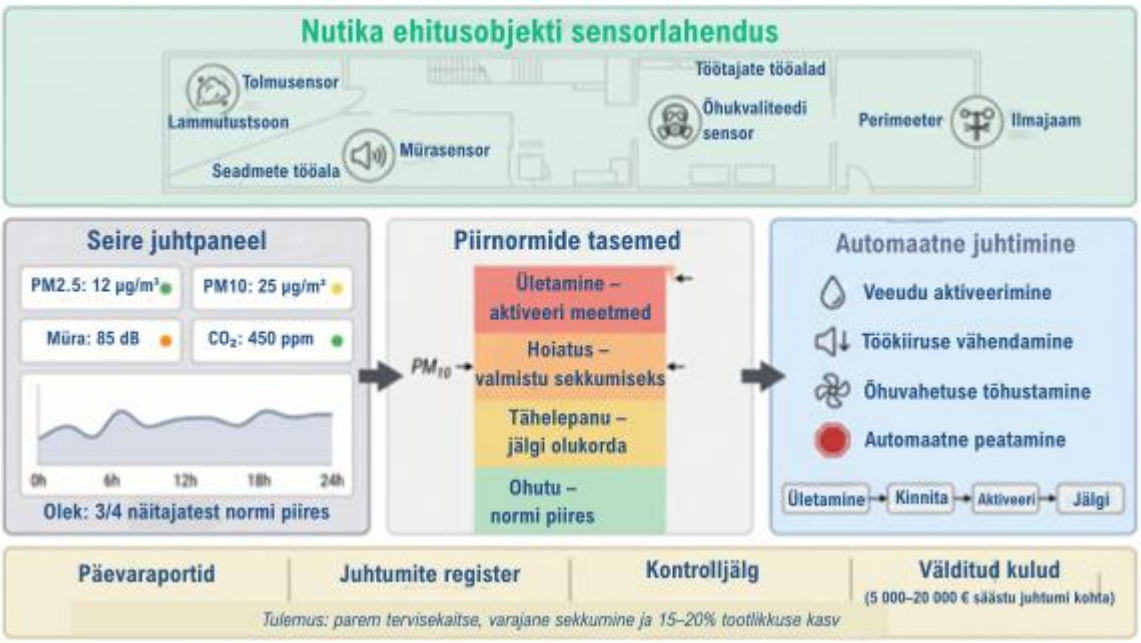
- Alusta väikeste sammudega: näiteks jälgi ühe projekti raames väärtuslikke tööriistu või betooni kivinemist;
- Mõõda investeeringutasuvust (ROI): võrdle seisakute vähenemist, väiksemaid kadusid või ajakava lühenemist süsteemi maksumusega;
- Laienda kasutuselevõttu järk-järgult: kui kasu on selge, laienda lahendust rohkematele seadmetele, materjalidele või ohutusfunktsioonidele;
- Integreeri olemasolevate töövoogudega: taga, et objektimeeskonnad pääseksid andmetele kergesti ligi ja saaksid nende põhjal tegutseda.

3. Sensorite tüübid: nutika ehitusobjekti „meeled“

Sensorid on nutika ehitusobjekti „meeled“. Need muudavad ehitusobjektil valitsevad tingimused mõõdetavateks andmeteks, et objektimeeskonnad saaksid teha kiireid ja põhjendatud otsuseid. Peatükis tutvustatakse ehituses kasutatavaid peamisi sensorikategooriaid ja selgitatakse lihtsate, ehitusobjekti igapäevatööga otseselt seotud näidete abil, miks need olulised on.

3.1 Keskkonnasensorid: ümbritsevate tingimuste jälgimine

Keskkonnasensorid jälgivad ehitusobjekti ümbritsevaid füüsilisi tingimusi. Need aitavad kaitsta töötajate tervist ja tagada, et projekt vastaks kohalikele nõuetele. Joonis 2 illustreerib nende sensorite tavapärast paigutust ja seda, kuidas need käivitavad nõuetele vastavuse tagamiseks automaatseid toiminguid.



Joonis 2. Nutika ehitusobjekti sensorlahendus: tsükkel reaalajas seirest automaatse juhtimistoiminguni. Allikas: autori illustratsioon, loodud tehisintellektil põhineva pildigeneraatori (PaperBanana) abil.

Tolmu- ja õhukvaliteedi sensorid (tahked osakesed)

Ehitustööde, nagu lõikamine, puurimine ja lammutamine, käigus eraldub õhku peentolmu, sealhulgas ränidioksiidi. Need osakesed on sissehingamisel tervisele ohtlikud, eriti pikaajalisel kokkupuutel. Tolmusensorid mõõdavad tahkete osakeste kontsentratsiooni õhus ja teavitavad mõõtetulemustest reaalajas.

Olulisus ehitusobjektil: kui tolmu tase ületab ohutu piirmäära, saab süsteem teavitada objektijuhti või tolmu leviku vähendamiseks automaatselt aktiveerida veepihustid. See kaitseb töötajaid ja vähendab õigusnormide rikkumise riski.

Mürasensorid (detsibellimõõturid)

Mürasensorid mõõdavad rasketehnika, lõikeriistade ja liikluse tekitatavat müritaset. Tiheda tegevusega ehitusobjektidel võib müratase kiiresti ületada ohutu piirnormi, eriti piiratud või kajavates ruumides.

Olulisus ehitusobjektil: süsteem saab teavitada töötajaid kuulmiskaitse kasutamise vajadusest ning aitab objektijuhtidel tõendada vastavust kohalikele müranormidele.

Temperatuuri- ja niiskussensorid

Need sensorid jälgivad ümbritseva keskkonna temperatuuri ja niiskust, mis mõjutavad nii töötajaid kui ka materjale. Kuumus ja niiskus võivad mõjutada betooni kivinemiskiirust, värvi kuivamist ning seda, kui ohutult saavad töötajad füüsilist tööd teha.

Olulisus ehitusobjektil: kõrge temperatuur suurendab kuumastressi riski ning kõrge õhuniiskus võib takistada pinnakatete või viimistlusmaterjalide nõuetekohast kuivamist. Õigeaegsed hoiatused võimaldavad meeskonnal kohandada tööajakava, pikendada puhkepause või vahetada kasutatavaid materjale.

3.2 Konstruktsiooni seisundiseire sensorid: hoone seisukorra jälgimine

Konstruktsioonide seisundiseire sensorid mõõdavad, kuidas hoone ja ajutised konstruktsioonid koormuse all käituvad. Erinevalt aeg-ajalt toimuvast visuaalsest kontrollist võimaldavad sensorid pidevat andmekogumist, sageli otse materjalide seest või raskesti ligipääsetavatest kohtadest.

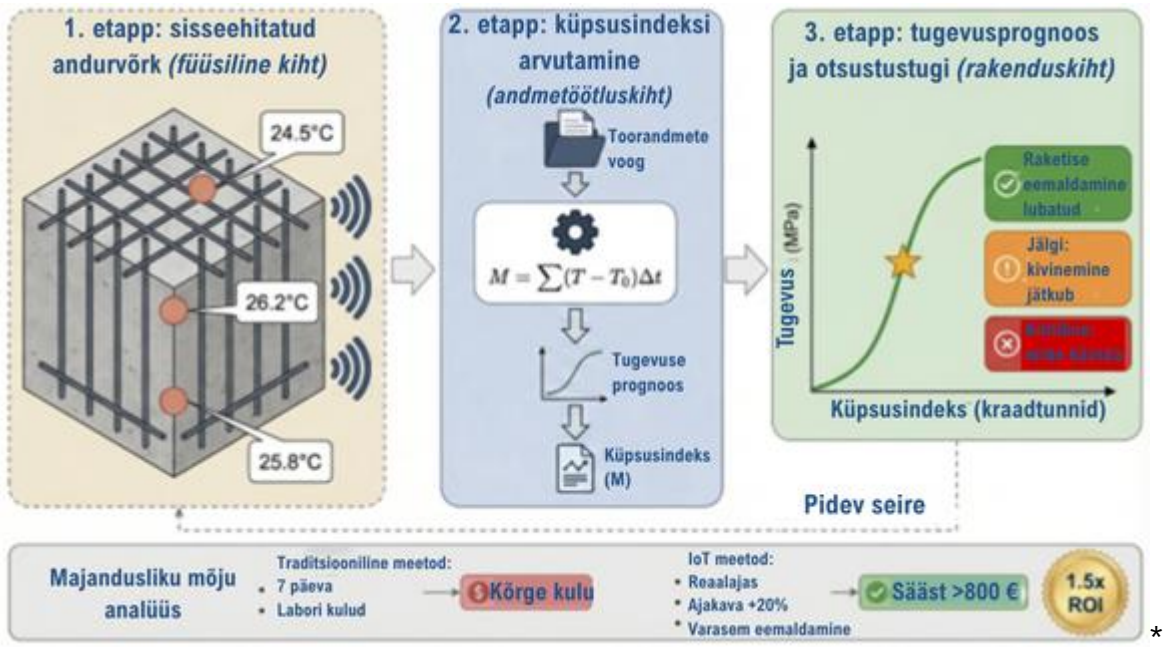
Paigaldusnäide: betooni küpsussensor paigaldatakse betoonplaati koos temperatuurisondi ja väikese andmesalvestiga, mis võimaldab jälgida tugevuse kasvu südamikuproove võtmata.

Betooni küpsussensorid (temperatuurisensorid)

Betooni küpsussensorid on väikesed traadita sondid, mis paigaldatakse märja betooni sisse. Need mõõdavad betooni sisetemperatuuri ja aega, mis koos näitavad, kui palju on betoon tugevust saavutanud. Joonis 3 näitab betooni küpsuse seire kolmeastmelist protsessi ja selle majanduslikku mõju. Mõiste „küpsus“ *(maturity)* viitab temperatuuri, aja ja tugevuse kasvu vahelisele seosele, mida arvutatakse sageli järgmise valemi abil:

$$M = \sum (T - T_0)\,\Delta t$$

Olulisus ehitusobjektil: raketise eemaldamiseks ei pea ootama kindlat ajavahemikku – sensor näitab täpset hetke, mil betoon saavutab sihttugevuse. See võib lühendada tööde kestust, säilitades samal ajal ohutuse.



Tärn 3. etapis näitab sihttugevuse läve saavutamist, pärast mida võib raketise eemaldada.
Joonis 3. Betooni küpsuse seire elutsükkel: konstruktsiooni sisse paigaldatud sensoritest rakenduskihi otsustustoeni. Allikas: autori illustratsioon, loodud tehisintellektil põhineva pildigeneraatori (PaperBanana) abil.

Deformatsiooni- ja kaldesensorid

Deformatsioonisensorid mõõdavad, kui palju tala või muu konstruktsioonielement koormuse all paindub. Kaldesensorid mõõdavad, kas sein, sammas või telling on ettenähtud asendist kõrvale kaldunud.

Olulisus ehitusobjektil: need sensorid on eriti olulised sügavkaevetöödel, ajutiste konstruktsioonide puhul ja vanemate hoonete lähedal toimuvatel renoveerimistöödel. Isegi mõnemillimeetrine nihkumine võib viidata tõsisele ohule.

Vibratsioonisensorid

Vibratsioonisensorid mõõdavad vibratsiooni, mis tekib näiteks vaiade rammimisel, puurimisel ja raskeveokite liikumisel. Need aitavad hinnata, kui palju energiat kandub maapinda või lähedalasuvatesse konstruktsioonidesse.

Olulisus ehitusobjektil: liigne vibratsioon võib kahjustada naaberhooneid või maa-aluseid kommunikatsioone. Seire tagab vastavuse õigusnormidele ja vähendab VKE-de vastutusriske.

3.3 Energia- ja ressursikasutuse seire: raiskamise vähendamine

Energia- ja ressursisensorid jälgivad, kui palju elektrit, vett ja kütust ehitusobjektil tarbitakse. Need toimivad ehitusobjekti ressursside arvestussüsteemina ja aitavad kiiresti raiskamist tuvastada.

Nutiarvestid ja elektrivoolu mõõtemuundurid

Nutiarvestid ja voolumõõtemuundurid kinnitatakse elektrikaablitele või ühendatakse jaotuskilpidega. Need mõõdavad konkreetse piirkonna või seadme tarbitavat elektrivõimsust.

Olulisus ehitusobjektil: andmete abil saab tuvastada nn varjatud energiatarbimist (*vampire loads*), näiteks ööseks tööle jäetud seadmeid. See vähendab energiakulusid ilma tootlikkust vähendamata.

Voolusensorid

Voolusensorid paigaldatakse veetorudele või voolikutele, et mõõta süsteemi läbiva vee vooluhulka.

Olulisus ehitusobjektil: vooluhulga järsk suurenemine võib viidata lekkele või purunenud torule. Varajane tuvastamine väldib veekahjustusi, vähendab tööseisakuid ja hoiab ära suuri kommunaalkulusid.

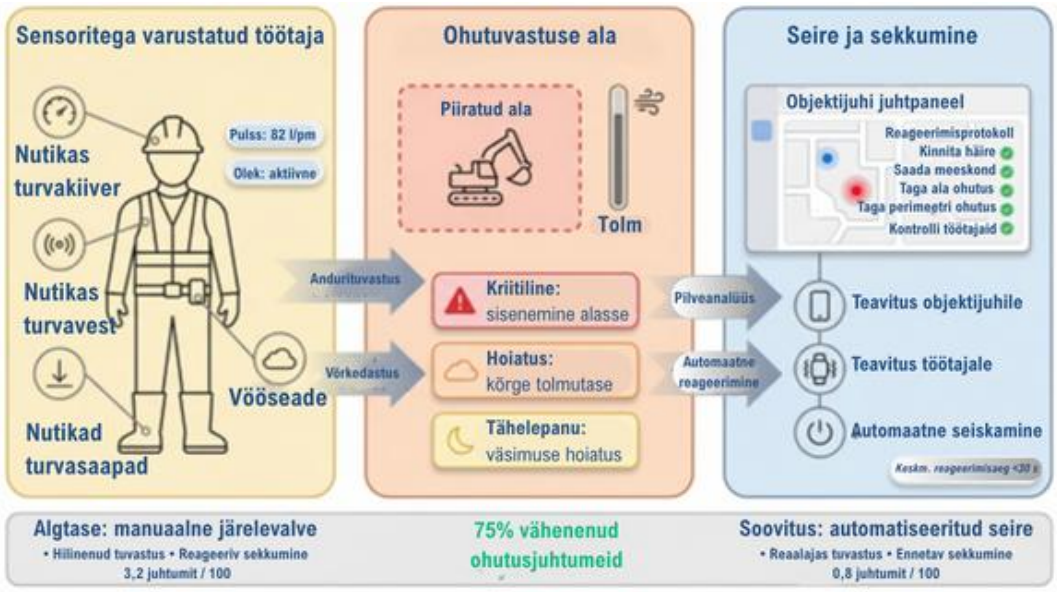
Kütusetaseme sensorid

Kütusetaseme sensorid paigaldatakse ehitusobjekti kütusepaakidesse või rasketehnika kütusesüsteemi. Need mõõdavad kütusetaset reaalajas ja võimaldavad tuvastada taseme järsku langust.

Olulisus ehitusobjektil: need aitavad vältida tühjadest paakidest põhjustatud ootamatuid seisakuid ja avastada kütusevargusi. See tagab kriitilise tähtsusega seadmete töövalmiduse ajal, mil neid vajatakse.

3.4 Ohutussensorid ja nutikad isikukaitsevahendid (IKV): töötajate ohutuse tagamine

Ohutussensorid ja nutikad isikukaitsevahendid (IKV) on ehitusobjekti kõige olulisemad asjade interneti (IoT) lahendused. Need täiendavad traditsioonilisi kaitsevahendeid elektrooniliste komponentidega, mis tuvastavad ohuolukordi ja käivitavad kohese teavituse. Joonis 4 näitab sensoritega varustatud töötaja seost ohutuvastustsooniga, mille tulemusel väheneb ohutusjuhtumite arv märkimisväärselt.



Märkus: joonisel esitatud arvväärtused on hüpoteetilised ja mõeldud üksnes selgitavaks otstarbeks.

Joonis 4. Sensoritega varustatud töötaja, ohutuvastustsoonide ja objektijuhi seiretegevuse omavaheline koostoime. Allikas: autori illustratsioon, loodud tehisintellektil põhineva pildigeneraatori (PaperBanana) abil.

Nutikiivrid (kiirendusmõõturid)

Nutikiivrites kasutatakse kiirendusmõõtureid kiiruse või suuna järskude muutuste tuvastamiseks. Sellised signaalid võivad viidata kukkumisele või löögile.

Omadus: kukkumise tuvastamisel saadab kiiver objektijuhile hädaolukorra teavituse koos töötaja asukohaga. See võimaldab kriitilistes olukordades kiiret reageerimist.

Nutikad (ühendatud) ohutusvestid (RFID või Bluetooth)

Nutikad ohutusvestid sisaldavad RFID- või Bluetooth-märgiseid, mis suhtlevad ehitusobjektil paiknevate majakate (*beacon*) või seadmesensoritega.

Omadus: lähedusteavitus. Kui töötaja siseneb keelualasse või satub liikuvale seadmele liiga lähedale, hakkab vest vibreerima või annab hoiatava helisignaali. See vähendab kokkupõrkeohtu.

Nutikad turvajalatsid (rõhusensorid)

Nutikad turvajalatsid võivad sisaldada rõhusensorit, mis mõõdab kehakaalu jaotumist ja liikumist.

Olulisus ehitusobjektil: ebatavaline rõhumuster võib näidata, et töötaja kannab liiga rasket koormat või on olnud liiga kaua liikumatu, ning viidata võimalikule terviseprobleemile.

Kantavad gaasidetektorid

Kantavad gaasidetektorid kinnitatakse riiete külge ning need võtavad pidevalt õhuproove ohtlike gaaside, näiteks vingugaasi või plahvatusohtlike aurude tuvastamiseks. Detektorid on hädavajalikud piiratud ligipääsuga ruumides, näiteks keldrites, tunnelites ja hoolduskaevudes.

Olulisus ehitusplatsil: varajane tuvastamine aitab vältida tõsiseid vigastusi ja surmajuhtumeid. Hoiatused võimaldavad töötajatel evakueeruda või ruume ventileerida enne, kui tingimused muutuvad ohtlikuks.

4. Andmete kogumine ja reaalajas seiresüsteemid

Paljude VKE-de jaoks ei ole suurim probleem sensori ostmine, vaid sensorinäitude muutmine ekraanil kuvatavaks selgeks ja kasutatavaks infoks. Seda protsessi nimetatakse andmete integreerimiseks. Hea seiresüsteem ühendab sensorid, sidevõrgud ja juhtpaneelid (*dashboards*) nii, et objektimeeskonnad märkaksid probleeme varakult ja saaksid kiiresti reageerida.

4.1 Andmesidesild (signaalist andmeteks)

Mõõtmise ja seire vahel eeltöödeldakse toorsignaale, vormistatakse need digitaalseteks andmepakettideks ning edastatakse juhtpaneelidele tõlgendamiseks.

- Signaali töötlemine: filtrid eemaldavad müra ja kalibreerivad sensori toorväljundi, et näidud oleksid stabiilsed ja võrreldavad;
- Pakettimine: mõõtmistulemused varustatakse ajatempliga ja vormistatakse väikesteks andmepakettideks, mis sisaldavad sensori ID-d, asukohta ja mõõtühikut;
- Andmeedastus: lüüsiseadmed edastavad paketid pilveteenustesse või kohalikele juhtpaneelidele LoRaWAN-i, NB-IoT, Wi-Fi või kaabelühenduse kaudu;
- Valideerimine: servtöötluse loogika kontrollib hälbeid, et valehäired meeskonda üle ei koormaks.

4.2 Andmepunkti teekond (samm-sammult)

Reaalajas seire toimimise mõistmiseks jälgige ühe andmepunkti teekonda, näiteks betooni sisse paigaldatud sensorilt saadud kõrge temperatuuri hoiatust.

1. Andmete kogumine (sensor): betooni sisse paigaldatud sond mõõdab betooni sisetemperatuuri.
2. Andmeedastus (lüüsiseade): sensor edastab Bluetoothi või LoRaWAN-i kaudu signaali ehitusobjektil asuvasse lüüsiseadmesse.
3. Andmete vastuvõtt (pilv): lüüsiseade edastab andmed Wi-Fi või 4G/5G kaudu turvalisse pilveserverisse.
4. Visualiseerimine (juhtpaneel): mõõtmistulemus kuvatakse objekti- või projektijuhi seadmes värvilise hoiatuse või trendigraafikuna.

Kõik etapid peavad toimima tõrgeteta, vastasel juhul võivad kriitilised teavitused hilineda. Seetõttu on vastupidavad seadmed ja stabiilne sideühendus ehitusobjektidel väga olulised.

4.3 Seiresüsteemide peamised komponendid

Lüüsiseade (objekti sidekeskus)

Tavalisest kodukasutuseks mõeldud Wi-Fi-ühendusest ei piisa suurel ja pidevalt muutuva paigutusega ehitusobjektil. Lüüsiseade on vastupidav ja ilmastikukindel seade, mis kogub andmeid paljudelt sensoritelt ja edastab need pilve.

Olulisus ehitusobjektil: lüüsiseade suudab korraga suhelda sadade seadmetega ja andmeid ajutiselt salvestada ka siis, kui internetiühendus katkeb. Selline puhverdamine tagab, et ohutus- ja kvaliteediandmed ei lähe kaduma.

Reaalajas juhtpaneelid (juhtimiskeskus)

Juhtpaneelid on objektimeeskonna peamised kasutajaliidesed. VKE-de jaoks on parimad juhtpaneelid lihtsad ja visuaalsed ning neis kasutatakse sageli foorisüsteemi.

- Roheline: tingimused on ohututes ja õigusaktidega lubatud piirides.
- Kollane: piirväärtus on lähenemas, näiteks kui betoon on saavutanud 90% sihttugevusest.
- Punane: vajalik on viivitamatu tegutsemine, näiteks töötaja kukkumise või veelekke korral.

Ülevaatlik juhtpaneel vähendab segadust ja võimaldab õigel inimesel kiiresti reageerida.

Servtöötlus (andmetöötlus seadmes)

Servtöötlus tähendab, et seade või lüüsiseade analüüsib andmeid enne nende pilve edastamist kohapeal. See vähendab ribalaiuse kasutust ja lühendab reageerimisaega.

Näide: ohutuskaamera kasutab tehisintellekti, et tuvastada, kas töötaja kannab kiivrit. Kaamera saadab teavituse ainult siis, kui tuvastatakse rikkumine, mitte ei edasta pilve tundide kaupa videosalvestisi.

4.4 Reaalajas otsuste tegemine: miks kiire reageerimine on oluline

Reaalajas seire muudab andmed kiirestitehtavateks otsusteks. See eristab nutikat ehitust traditsioonilisest aruandlusest.

- Ennustav hooldus: kui kraana mootori vibratsioon ületab tavapärase taseme, teavitab süsteem hooldustöötajaid enne rikke tekkimist;
- Dünaamiline tööde planeerimine: tugeva vihma korral võib süsteem betoonitarneid edasi lükata, et vältida materjali raiskamist;
- Ohutustsooni geotarastus: kui töötaja siseneb kraana pöörderaadiusesse, võtab kantav seade vastu geotara piirisignaali, hakkab kohe vibreerima ja teavitab objektijuhti;
- Nõuetele vastavuse automaatne dokumenteerimine: müra- ja tolmuaruandeid saab järelevalveasutustele või klientidele koostada automaatselt.

Need lahendused vähendavad seisakuid, aitavad vältida tööde ümbertegemisi ning kaitsevad nii töötajaid kui ka eelarvet.

4.5 Seos digikaksikuga (lühitutvustus)

Keerukamates projektides ühendatakse reaalajas andmed digikaksikuga – 3D-BIM-mudeliga, mis tingimuste muutumisel uueneb. Asjade interneti (IoT) seadmed edastavad pideva andmevoona mõõtmistulemusi, mis seostatakse BIM-mudelis vastavate ruumide ja asukohtadega. Nii näeb hoonehaldur peale riskide ka nende täpset asukohta mudelis.

Näide: BIM- mudeli 2. korrusega seotud betooni küpsussensor näitab, et betoon on saavutanud 68% tugevust, samal ajal kui tehnosüdamikus paikneva vibratsioonisensori näit ületab piirväärtuse. Mudel toob mõlemad asukohad kiireks kontrollimiseks esile.

Võimalikud hoonehaldustoimingud: lükata raketise eemaldamine edasi, kontrollida külgnevaid seinu ning kohandada kütte-, ventilatsiooni- ja kliimasüsteemi (HVAC) seadeväärtusi reaalajas andmevoo põhjal. Reaalajas IoT-andmete sidumine BIM-mudeliga annab hoonehalduritele reaalajas ruumilise ülevaate objekti riskidest ja tingimustest. Selline integreerimine vähendab käsitsi kontrollimise vajadust, toetab kiiremat otsustamist ja lihtsustab objekti üleandmist omanikule, sest staatilise joonise asemel saab omanik ajakohastuva digitaalse mudeli.

5. Juhtumiuuring: RINNO renoveerimisprojekt

5.1 Projekti kontekst

- Toimumiskoht: mitmed ehitusobjektid Euroopas, sealhulgas Taanis, Poolas ja Kreekas.
- Hoone tüüp: vanemad korterelamud, mille puhul on kasutatud erinevaid ehitusmeetodeid ja kus on säilinud vanad tehnosüsteemid;

- Väljakutse: vananevate hoonete süvarenoveerimine olukorras, kus seinte, vundamentide ja tehnosüsteemide seisukord oli teadmata;
- Eesmärk: lühendada renoveerimisaega umbes 30% ja vähendada märkimisväärselt energiakulusid.

Vanemate hoonete renoveerimine on riskantsem kui uute hoonete ehitamine, sest paljud probleemid on varjatud. Niiskus, nõrgad konstruktsioonielemendid ja ebatõhusad küttesüsteemid ilmnevad sageli alles pärast tööde algust. Asjade internetti (IoT) kasutati nende probleemide varasemaks tuvastamiseks ning ohutumate otsuste tegemiseks lammutus- ja renoveerimistööde ajal.

5.2 Kuidas asjade interneti (IoT) sensorid toetasid renoveerimist

1. etapp: uurimisfaas (sisekeskkonna kvaliteedi sensorid, IEQ)

Enne ehitustööde algust paigaldati valitud korteritesse mitmeks nädalaks sisekeskkonna kvaliteedi (IEQ) sensorid. Need sensorid kogusid lähteandmeid, et renoveerimiskava saaks keskenduda probleemide algpõhjustele, mitte ainult nähtavatele sümptomitele.

- Mõõdeti süsinikdioksiidi (CO_2) kontsentratsiooni, õhuniiskust ja temperatuuri.
- Peamine leid: nurgakorterites püsis õhuniiskus pikemat aega üle 70%, mis viitas niiskuse kogunemisele.
- Diagnoos: andmed näitasid, et probleem ei olnud ainult sisemine kondensatsioon, vaid välissoojustussüsteemi puudulikkus.
- Tulemus: siseseinte remontimise asemel korrastas VKE hoone välissoojustussüsteemi ja ventilatsioonilahendused. See hoidis ära hallituse taastekke pärast renoveerimist ning kaitses uut värvkatet ja kipsplaate.

2. etapp: ohutuse tagamise faas (konstruktsiooni- ja vibratsioonisensorid)

Lammutus- ja konstruktsioonitööde ajaks paigaldati kandvatele seintele ja kahjustusohuga kohtadesse vibratsiooni- ja kaldesensorid. See võimaldas meeskonnal kohe ohtlikku nihkumist tuvastada.

- Juhtum: vana põranda eemaldamise ajal käivitas vibratsioonisensor punase hoiatuse.
- Tegevus: töö peatati ja kohe alustati ehitusobjekti ülevaatust.
- Avastus: vibratsioon nõrgestas vana korstna, mida ei olnud algsetel ehitusjoonistel näidatud konstruktsiooni.
- Tulemus: varajane tuvastamine hoidis ära võimaliku varingu ja töötajate vigastused ning vähendas konstruktsioonide remondikulusid. VKE-le tähendas see ka tööde hilinemise, kahjunõuete ja mainekahju vältimist.

3. etapp: arvestusfaas (energiakasutuse seire)

Renoveerimise mõju tõendamiseks jälgisid nutikad energiaarvestid elektri- ja kütteenergia tarbimist enne ja pärast renoveerimist. See võimaldas esitada hoone omanikule andmetel põhinevaid aruandeid.

- Võrdlus enne ja pärast: IoT-juhtpaneel näitas energiaraiskamise märkimisväärset vähenemist.
- Mõõdetud tulemus: IoT-põhine energiaseire kinnitas, et pärast soojustuse ja HVAC-süsteemi juhtimise täiustamist vähenesid elektrikulud vähemalt 30% ning ajakulu ligikaudu 40% võrreldes tavapäraste renoveerimislahendustega (RINNO projekt).
- Väärtus kliendile: VKE sai pakkuda andmetega tõendatud täitmistagatist.
- Tulemus: andmed aitasid VKE-l näidata reaalset energiakokkuhoidu, võita kliendi usaldus ja osaleda uute projektide hangetel.

5.3 Peamised õppetunnid VKE-dele

- Alusta diagnoosist: lähteandmed toovad algpõhjused esile enne tööde algust;

- Kaitse töötajaid reaalajas teavitustega: konstruktsiooni seisukorra sensorid vähendavad lammutustöödega seotud riske;
- Toetu tõenditele, mitte lubadustele: energiakasutuse andmed suurendavad usaldusväärsust ja toetavad toimivusgarantiide andmist;
- Seosta IoT-lahendused projekti etappidega: eri sensorid loovad väärtust renoveerimise eri etappides.

Juhtum näitab, et asjade internet (IoT) ei ole mõeldud ainult suurtele ehitusettevõtjatele. Kui seda kasutatakse sihipäraselt renoveerimise valitud etappides, aitab see VKE-del teha renoveerimistöid ohutumalt, vähendada tööde ümbertegemist ja dokumenteerida mõõdetavaid tulemusi.

6. Praktilised sammud VKE-dele lihtsa sensortehnoloogia kasutuselevõtuks

Asjade interneti (IoT) kasutuselevõtt ei pea olema kallis ega keeruline. Kõige edukamad VKE-d alustavad väikese katseprojektiga, tõendavad kiiresti selle kasulikkust ja laiendavad kasutuselevõttu alles siis, kui investeeringutasuvus on selge. Allpool esitatud sammud moodustavad praktilise tegevuskava, mis tugineb varasemates peatükkides käsitletud sensoritele, andmevoole ja reaalajas seirele.

6.1 1. samm: tuvasta kitsaskoht (Miks?)

Enne riistvara ostmist peaks VKE kindlaks tegema oma projektides suurima kahju- või riskiallika. VKE-d kõhklevad sageli, sest lahenduse kasulikkus ei ole piisavalt selge. Seetõttu peab esimene kasutusjuht andma mõne nädala jooksul selgelt nähtava kokkuhoiu või parandama tööohutust.

Kasuta lihtsat investeeringutasuvuse (ROI) kontrolli – näiteks võrdle ühes kuus kaotatud tööriistade väärtust stardikomplekti maksumusega –, et näidata tasuvust ja vähendada ebakindlust.

- Stsenaarium A: tööriistade kadumine või vargus on sage. Alusta varade asukohaseirest RFID- või GPS-märgiste abil.
- Stsenaarium B: projekti ajakava määravad suures osas betoonitööd. Alusta betooni küpsussensoritest.
- Stsenaarium C: projektid asuvad rangete nõuetega tihedalt asustatud linnapiirkondades. Alusta müra- ja tolmuseirest.
- Stsenaarium D: seadmed lähevad sageli rikki. Alusta vibratsiooni või mootori temperatuuri seirest.

Selgelt määratletud kitsaskoht aitab investeeringut põhjendada ja lihtsustab tulemuste mõõtmist.

6.2 2. samm: vali sobiv ühenduvus (Kuidas?)

Ühenduvus määrab, kuidas sensorandmed liiguvad ehitusobjektilt juhtpaneeli. Ehitusobjektidel puudub sageli stabiilne Wi-Fi-levi. Seetõttu peaks VKE valima võrgu, mis töötab usaldusväärselt ja vajab võimalikult vähe seadistamist.

- LoRaWAN: suur leviala ja madal energiatarve. Signaalid levivad läbi betooni ja pikkade vahemaade taha üle suure ehitusobjekti. Akud kestavad aastaid.
- NB-IoT / LTE-M: kasutab olemasolevaid mobiilsidevõrke väikeste andmepakettide edastamiseks. Kasutuselevõtt on lihtne ja vajab vähe seadmeid.
- Wi-Fi: sobib objektikontorite või soojakute lähedusse, kuid selle leviala on piiratud ja see vajab stabiilset elektritoidet.
- Piirkondlik näide (Eesti): arenenud digitaristu ja ulatuslik NB-IoT leviala toetavad lihtsalt ühendatavate ja kohe kasutusvalmis lahenduste (*plug-and-play*) kasutuselevõttu, samas kui

LoRaWAN sobib hästi kõrvalistesse asukohtadesse või ehitusobjektidele, kus on palju teraskonstruktsioone.

Enamiku VKE-de jaoks pakuvad LoRaWAN või NB-IoT parimat tasakaalu leviala, hinna ja kasutuslihtsuse vahel.

6.3 3. samm: alusta stardikomplektiga

Paljud tootjad pakuvad valmis stardikomplekte, mis sisaldavad lüüsiseadet, väikest sensorite komplekti ja eelseadistatud juhtpaneeli. Need komplektid võimaldavad meeskonnal katsetada IoT-lahendust juba mõne päeva, mitte alles mitme kuu jooksul.

- Tavaline stardikomplekt sisaldab üht lüüsiseadet, 5–10 sensorit ja lihtsat veebipõhist juhtpaneeli;
- Levinud sensoritüübid: temperatuuri-, niiskus- ja liikumissensorid ning lihtsad varamärgised;
- Stardikomplekti hinnavahemik on tavaliselt 250–500 eurot, sõltuvalt piirkonnast ja tarnijast.

Stardikomplekt vähendab riski, sest annab andmetest kohe ülevaate ega vaja kohandatud integratsiooni. Samuti annab see meeskonnale praktilise õppimisvõimaluse. Sobivate IoT stardikomplektide leidmiseks ehitusvaldkonnas sobivad otsingusõnad on näiteks: „IoT stardikomplekt“, „LoRaWAN komplekt“ või „ehitusobjekti keskkonnaseire sensorid“. Näiteid stardikomplekte pakkuvatest tootjatest: Monnit (https://www.monnit.com), Elsys (https://www.elsys.se) ja Dragino (https://www.dragino.com).

6.4 4. samm: kasuta lihtsat ja kiiret paigaldust („paigalda ja jälgi“-lähenemine)

Kaasaegsed sensorid on disainitud kiireks paigaldamiseks. Need on traadita, akutoitega ning kinnitatavad magneti või liimiga, mistõttu sobivad hästi ajutistesse ja muutuvatesse ehituskeskkondadesse.

- Traadita seadistus: ei vaja kaabeldust ega elektritöid.
- Magnet- või liimkinnitused: sensorid saab minutitega kinnitada seadmetele, seintele või konteineritele.
- Pikk aku tööiga: paljud sensorid töötavad 5–10 aastat ja toetavad „paigalda ja unusta“-lähenemist;
- Ümberpaigutamine: seadmeid saab projekti edenedes kergesti ümber paigutada.

VKE jaoks on kasutuselevõtu lihtsus väga oluline, sest see vähendab töökorralduse häireid ja aitab vältida lisaspetsialistide kaasamist.

6.5 5. samm: arenda töötajate oskusi (Hoia asi lihtsana!)

IoT-lahenduste kasutuselevõtt õnnestub siis, kui objektimeeskonnad mõistavad sensorite eesmärki. Koolitus ei pea olema keeruline, kuid see peab looma usaldust ja selgust.

- Tööeelne ohutusvestlus (*toolbox talk*): 15-minutiline juhendamine, mille käigus selgitatakse, mida mõõdetakse ning miks see parandab ohutust ja töö tõhusust;
- Privaatsusküsimuste käsitlemine: rõhuta, et eesmärk on riskide vähendamine, mitte töötajate isikliku töösoorituse jälgimine;
- IoT eest vastutav isik: määra üks inimene, näiteks töödejuhataja, kes vaatab juhtpaneeli iga päev üle ja märgib kõrvalekalded;

Kui töötajad mõistavad süsteemi väärtust, on nad tõenäolisemalt valmis seda toetama ja kiiresti reageerima teavitustele.

6.6 Eetika, privaatsus- ja küberturvalisuse aspektid

- Andmekaitse: muuda töötajate asukohaandmed anonüümseks, kasutades tsoonipõhiseid vaateid, vahetuvaid tunnuseid ja lühikesi andmete säilitamise perioode. Eesmärk on tagada ohutus, mitte kontrollida töötajate tegevust pisiasjadeni.
- Andmete omandiõigus: täpsusta lepingutes, et ehitusobjektil kogutud andmed kuuluvad töövõtjale või VKE-le, mitte sensorite tarnijale.
- Küberturvalisus: kaitse lüüsiseadet kordumatute autentimisandmete, krüpteeritud ühenduste, korrapäraste uuenduste ja võrgu segmentimise abil, et vähendada küberrünnete ohtu.

7. Ülesanded

Vali iga küsimuse jaoks kõige sobivam vastus. Vastusevõti on lõpus.

1. Milline asjade interneti (IoT) kiht vastutab sensorite toornäitude muutmise eest hoiatusteks või juhtpaneelil kuvatavaks infoks?

A) Sensorkiht (sensing layer)

B) Võrgukiht (network layer)

C) Andmetöötlus- ja rakenduskihid

D) Toitehalduse kiht

2. Milline traadita tehnoloogia sobib kõige paremini suure leviala ja väikese energiatarbega sensoritele suurtel välitingimustes paiknevatel ehitusobjektidel?

A) LoRaWAN

B) Bluetooth Classic (klassikaline Bluetooth)

C) NFC (lähitoimeside tehnoloogia)

D) Zigbee (madala energiatarbega juhtmevaba side standard)

3. Milline on lüüsiseadme (*gateway*) peamine eesmärk ehitusobjektil?

A) Töötajate koolitamine

B) Sensoriandmete teisendamine ja edastamine pilveteenusesse

C) BIM-failide salvestamine projekteerimiseks

D) Kõigi sensorite asendamine kaameratega

4. Milline sensor võimaldab kõige paremini kindlaks teha, kas betoonivalu on raketise eemaldamiseks piisavalt tugev?

A) Gaasidetektor

B) Betooni küpsussensor (temperatuurisensor)

C) Müramõõtur

D) RFID-märgis

5. Mida tähendab kollane olek foorisüsteemiga juhtpaneelil tavaliselt?

A) Vajalik on viivitamatu tegutsemine

B) Süsteem on võrguühenduseta

C) Lähenetakse piirväärtusele

D) Andmed puuduvad

6. Milline stsenaarium sobib kõige paremini esimeseks katseprojektiks VKE-le, kus tööriistu sageli kaob?

A) Nutikate isikukaitsevahendite kasutuselevõtt

B) Varade asukohaseire RFID- või GPS-märgiste abil

C) Digikaksiku kasutuselevõtt

D) Tehisintellektil põhinev videoanalüüs

7. Mis on servtöötluse *(edge computing)* peamine eelis ehitusobjektil?

A) Kaotab vajaduse sensorite järele

B) Vähendab ribalaiuse kasutust ja lühendab reageerimisaega

C) Tagab 100% võrgu töökindluse

D) Asendab pilvsalvestuse

8. Milline sensor tuvastaks kõige paremini kaldu vajunud tellingu enne selle kokkuvarisemist?

A) Kaldesensor

B) Temperatuurisensor

C) Voolusensor

D) CO_2-sensor

9. Mis on peamine risk, kui tuginetakse üksnes käsitsi tehtavatele ohutuskontrollidele ega kasutata IoT-lahendusi?

A) Pikem aku tööiga

B) Kiirem aruandlustsükkel

C) Ohtude hilinenud tuvastamine

D) Vähem ranged nõuetele vastavuse nõuded

10. Milline sensoritüüp sobib kõige paremini naaberhoonetele avalduva vibratsioonimõju seireks?

A) Vibratsioonisensor

B) Niiskussensor

C) Valgussensor

D) RFID-märgis

11. Mis on digikaksiku eesmärk keerukates seiresüsteemides?

A) Asendada ehitusgraafik

B) Kuvada ehitusobjekti reaalajas tingimusi 3D-mudelis

C) Säilitada finantsandmeid

D) Tagada mobiilside leviala

12. Milline tegevus vastab kõige paremini VKE-de IoT kasutuselevõtu 1. sammule?

A) Osta uusimad saadaolevad sensorid

B) Tuvastada ehitusobjekti suurim kahju- või riskiallikas

C) Võtta kasutusele terviklik digikaksik

D) Viia kõik seadmed üle 5G-le

13. Mis on RFID- või Bluetooth-märgistega ohutusvestide peamine ülesanne?

A) Mõõta temperatuuri

B) Hoiatada töötajat ohtlikule alale või liikuvale seadmele liiga lähedale sattumisel

C) Jälgida betooni tugevust

D) Jälgida kütusetaset

14. Milline kirjeldus iseloomustab kõige paremini IoT kasutuselevõtu stardikomplekti?

A) Eritellimusel loodud süsteem, mille integreerimine kestab mitu kuud

B) Lüüsiseadet, mõnda sensorit ja lihtsat juhtpaneeli sisaldav komplekt

C) Ainult tarkvaralitsentsid ilma riistvarata

D) Tööohutuskoolituse asendus

Vastustevõti:

1) C 2) A 3) B 4) B 5) C 6) B 7) B 8) A 9) C 10) A 11) B 12) B 13) B 14) B

8. Kasutatud kirjandus

1. 3GPP (2016). *NB-IoT and LTE-M: Release 13 ülevaade.* Kättesaadav: https://www.3gpp.org/ (Vaadatud 21. aprillil 2026).

2. European Commission CORDIS (2020). *RINNO – An Augmented Intelligence-Enabled Framework for Deep Energy Renovation (Horisont 2020, toetusleping nr 892071).* Kättesaadav: https://cordis.europa.eu/project/id/892071 (Vaadatud 21. aprillil 2026).

3. International Organization for Standardization (2018). *ISO 19650-1:2018 – Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM).*
Kättesaadav: https://www.iso.org/standard/68078.html (Vaadatud 21. aprillil 2026).

4. **LoRa Alliance** (2020). *LoRaWAN Specification v1.0.4.*
Kättesaadav: https://lora-alliance.org/resource-hub/lorawan-specification/ (Vaadatud 21. aprillil 2026).

5. OSHA (2016). *Respirable Crystalline Silica in Construction.* Kättesaadav: https://www.osha.gov/silica-crystalline (Vaadatud 21. aprillil 2026).

6. WHO (2018). *Environmental Noise Guidelines for the European Region.* Kättesaadav: https://www.who.int/europe/publications/i/item/9789289053563 (Vaadatud 21. aprillil 2026).

2. teema. Liitreaalsus (AR) ja virtuaalreaalsus (VR) ohutumaks ja tõhusamaks renoveerimiseks

Õpieesmärgid. Õpiväljundid. Sõnastik.

Õpieesmärgid

Mooduli eesmärk on anda väikestele ja keskmise suurusega ettevõtetele (VKE-dele) ning kutsehariduse ja -koolituse spetsialistidele praktiliselt rakendatav raamistik liitreaalsuse (AR) ja virtuaalreaalsuse (VR) tehnoloogiate kasutuselevõtuks renoveerimiskeskkonnas.

Mooduli peamised õpieesmärgid on:

- pakkuda VKE-dele ja VET-koolitajatele (Vocational Education and Training, VET) praktilist raamistikku immersiivsete tehnoloogiate mõistmiseks ja kasutuselevõtuks;
- näidata nende tehnoloogiate praktilist väärtust üleminekul traditsioonilistelt arhitektuurijoonistelt ehitusobjektil kasutatavatele täpsetele 3D-ruumiandmetele;
- aidata ületada digioskuste lõhet, tutvustades kättesaadavaid ja taskukohaseid immersiivtehnoloogia lahendusi, mis on kohandatud renoveerimise tööprotsessidele.

Õpiväljundid

Mooduli eduka läbimise järel õppijad:

1. oskavad eristada liitreaalsuse (AR) ja virtuaalreaalsuse (VR) modaalsusi ning valida objekti ohutuspiirangute ja töökorralduslike nõuete põhjal sobiva tehnoloogia;
2. oskavad selgitada kognitiivseid mehhanisme, mille kaudu virtuaalreaalsusel (VR) põhinev ohutuskoolitus saavutab teadmiste kõrge meeldejätmise määra, eelkõige ohtlike materjalide tuvastamisel;
3. oskavad rakendada liitreaalsuse (AR) meetodeid, nagu „näe-mida-mina-näen“ (SWIS) ja „röntgennägemine“ (*X-Ray Vision*), ehitusobjekti kaugjuhendamiseks ning konfliktide ennetavaks tuvastamiseks (*clash detection*);
4. oskavad arvutada immersiivsete tehnoloogiate investeeringutasuvust (ROI), lähtudes välditud ümbertegemise ja ajakava optimeerimise empiirilistest mudelitest;
5. oskavad tuvastada ja leevendada VKE-de ees seisvaid olulisi tehnoloogia kasutuselevõtu probleeme, sealhulgas riistvara vastupidavuse, keskkonna valgustingimustest tulenevate piirangute ja omamise kogukuluga (TCO) seotud probleeme.

Sõnastik

AR - liitreaalsus (*Augmented Reality*)	digitaalse info reaalajas kuvamine kasutaja vaates füüsilisele keskkonnale, säilitades kasutaja ruumitaju ja perifeerse nägemise.
VR - virtuaalreaalsus (*Virtual Reality*)	täielikult sünteetiline digikeskkond, mis varjab füüsilise maailma täielikult ja mida kogetakse tavaliselt VR-peakomplekti ehk peas kantava kuvaseadme (HMD) abil.

SMR - segareaalsus (*Mixed Reality*)	liitreaalsuse edasiarendus, milles digitaalsed objektid püsivad ruumis kindlal kohal ja ankurduvad interaktiivselt füüsilistele pindadele.
XR - laiendatud reaalsus (*Extended Reality*)	katusmõiste, mis hõlmab liitreaalsuse (AR), virtuaalreaalsuse (VR) ja segareaalsuse (MR) tehnoloogiaid.
Digikaksik (*Digital Twin*)	füüsilise vara või hoonesüsteemi dünaamiline, arvutuslikult ajakohastatav virtuaalne koopia.
VR-peakomplekt (peas kantav kuvaseade - (*Head-Mounted Display,* HMD)	peas kantav optiline kuvaseade, mis pakub kasutajale immersiivset visuaalset kogemust.
SLAM - samaaegne lokaliseerimine ja kaardistamine (*Simultaneous Localization and Mapping*)	arvutinägemise põhialgoritm, mis võimaldab mobiilseadmel kaardistamata füüsilises keskkonnas iseseisvalt kindlaks teha oma asukoha ja ruumilise orientatsiooni.
SWIS - „Näe-mida-mina-näen“ („*See-What-I-See*“)	kaugtoe lahendus, mis võimaldab kaugeksperdil näha töötaja kaamerapilti reaalajas ja kuvada sellele ülekattena ruumiliselt ankurdatud digitaalseid märkusi.
TCO - omamise kogukulu (*Total Cost of Ownership*)	tehnoloogia kasutuselevõtu terviklik kulumudel, mis hõlmab esmast riistvara soetamist, korduvaid tarkvara tellimustasusid ja hoolduskulusid.

1. Sissejuhatus

Olemasolevate ehitiste renoveerimine toob kaasa ainulaadseid väljakutseid, mida uute hoonete ehituses põhimõtteliselt ei esine. See tuleneb peamiselt sellest, et tänapäevased projektlahendused tuleb sobitada olemasolevate, sageli ebatäiuslike ja vananevate hoonetega. Uusehituses töötavad ehitajad justkui „tühjal lõuendil“, kus digimudelid vastavad täpselt tasandatud ehitusplatsile. Renoveerimisel vastab olemasolev konstruktsioon – dokumenteerimata kandvate seinte, vajuvate vundamentide ja ebasümmeetriliste tehnosüsteemidega – harva täielikult algsetele arhitektuurimudelitele.

1.1 Kommunikatsiooni areng ehitusobjektil

Immersiivsete tehnoloogiate ümberkujundava potentsiaali mõistmiseks on kasulik lühidalt jälgida ehitusobjektil toimuva kommunikatsiooni ajaloolist arengut. Sajandeid tugines ehitussektor projekteerimiskavatsuse edastamisel üksnes käsitsi joonistatud 2D-projektijoonistele. See pani ehitajale märkimisväärse kognitiivse koormuse, sest temalt oodati, et ta suudaks paberil olevad kahemõõtmelised jooned mõttes keerukaks ja mitmemõõtmeliseks füüsiliseks reaalsuseks teisendada.

20. sajandi lõpus arvutipõhise projekteerimise (CAD) kasutuselevõtt digiteeris selle protsessi, kuid säilitas suures osas 2D-kujutamise põhimõtte. Sisuline üleminek tõeliselt parameetrilisele 3D-esitusele toimus ehitusinfo modelleerimine (BIM) laialdase kasutuselevõtuga, mille puhul digitaalsed elemendid sisaldasid konkreetset funktsionaalset ja struktuurilist infot (Sacks et al., 2018). Kuigi BIM muutis projekteerimisbüroo töö põhjalikult ümber, jäi selle mõju aktiivsel ehitusobjektil piiratuks, kuna töötajad pidid endiselt vaatama alla tahvelarvutis või trükitud plaanil olevale 2D-kujutisele ja seejärel üles neid ümbritsevasse 3D-keskkonda.

1.2 Usalduslõhe (*trust gap*) ja kognitiivne mahalaadimine

Selline tuginemine jooniste mõttes ruumiliseks tõlgendamisele tekitab märkimisväärse kognitiivse barjääri, mida sageli nimetatakse usalduslõheks (*trust gap*). Arhitektuurialase ettevalmistuseta tellijatel ja isegi vähem kogenud oskustöötajatel on sageli keeruline täpselt tõlgendada 2D-jooniseid või isegi lamedal ekraanil vaadeldavat keerukat 3D-mudelit ruumiliseks reaalsuseks. See lõhe põhjustab sageli vääritimõistmist, klientide rahulolematust ning projekti käigus esitatavaid muudatustellimusi.

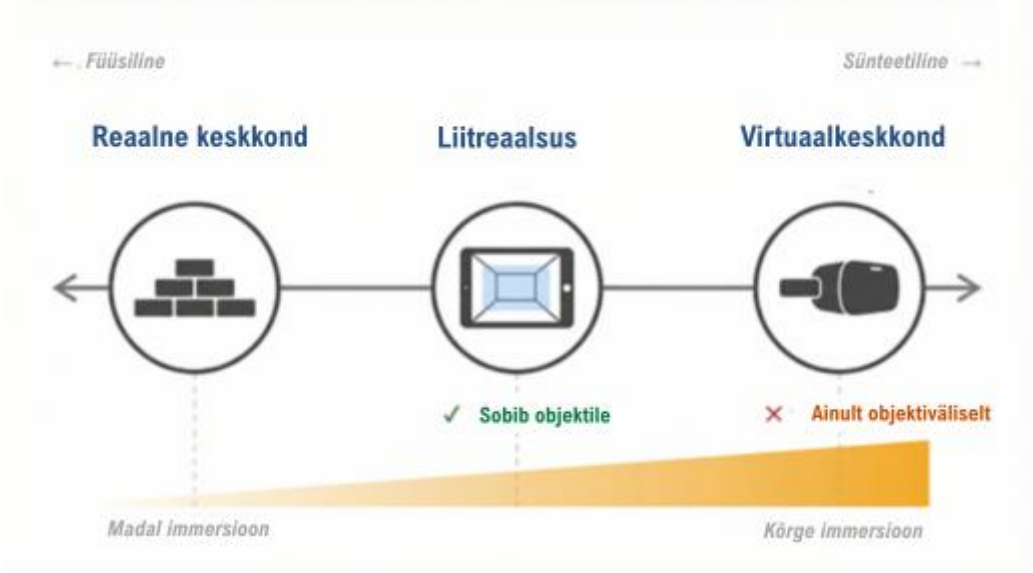
Liitreaalsus (AR) ja virtuaalreaalsus (VR) lahendavad selle probleemi psühholoogilise mehhanismi abil, mida nimetatakse kognitiivseks mahalaadimiseks. (*cognitive offloading*). Immersiivne digitehnoloogia kuvab ruumi kasutaja suhtes tegelikus 1:1 mõõtkavas, mistõttu kaob vajadus ruumilist olukorda mõttes visualiseerida. Nii ei pea sidusrühmad enam ette kujutama, kuidas kavandatav ventilatsioonikanal ripplae kohale sobitub — tehnoloogia kuvab kanali täpselt seal, kuhu see paigaldatakse. See põhimõtteline muutus võimaldab osapooltel suunata oma kognitiivsed ressursid täielikult kõrgema taseme ülesannetele: otsuste tegemisele, ruumilisele planeerimisele ja ohtude kiirele tuvastamisele.

1.3 Kättesaadavus VKE-dele

Ajalooliselt olid liitreaalsus- (AR) ja virtuaalreaalsus- (VR) tehnoloogiad ülemäära kallid ning nende kasutamine piirdus mitme miljoni euro suuruste taristuprojektide ja kõrgtehnoloogilise lennundus- ning kosmosetehnikaga. Tänapäeva ehitussektoris on immersiivsed tehnoloogiad muutunud VKE-dele hästi kättesaadavaks ja majanduslikult tasuvaks. Tarbijaklassi mobiilseadmete – eelkõige LiDAR-skanneriga tahvelarvutite – ühendamine eraldiseisvate VR-peakomplektidega, nagu Meta Quest 3, annab alla 1500 euro maksva tervikliku immersiivse tööriistakomplekti. Käesolev moodul käsitleb nende tehnoloogiate praktilisi rakendusi, pedagoogilisi eeliseid ohutuskoolituses ning selgelt määratletud investeeringutasuvust (ROI), mis kaasneb nende ümberkujundavate vahendite kasutuselevõtuga igapäevastes renoveerimisprojektides.

2. Digireaalsuse spekter

Immersiivseid tehnoloogiaid ei käsitleta sageli eraldiseisvate töövahenditena, vaid punktidena katkematul spektril, mida määratleb see, mil määral need asendavad füüsilise keskkonna sünteetilise kujutisega (Milgram & Kishino, 1994). Reaalsuse–virtuaalsuse kontiinumi mõistmine on ehitusjuhtidele hädavajalik, eelkõige seetõttu, et ümbritseva keskkonna takistamatu tajumise vajadus on projekti elutsükli eri etappides erinev.



Joonis 1. Reaalsuse–virtuaalsuse kontiinum

2.1 Kaks peamist modaalsust

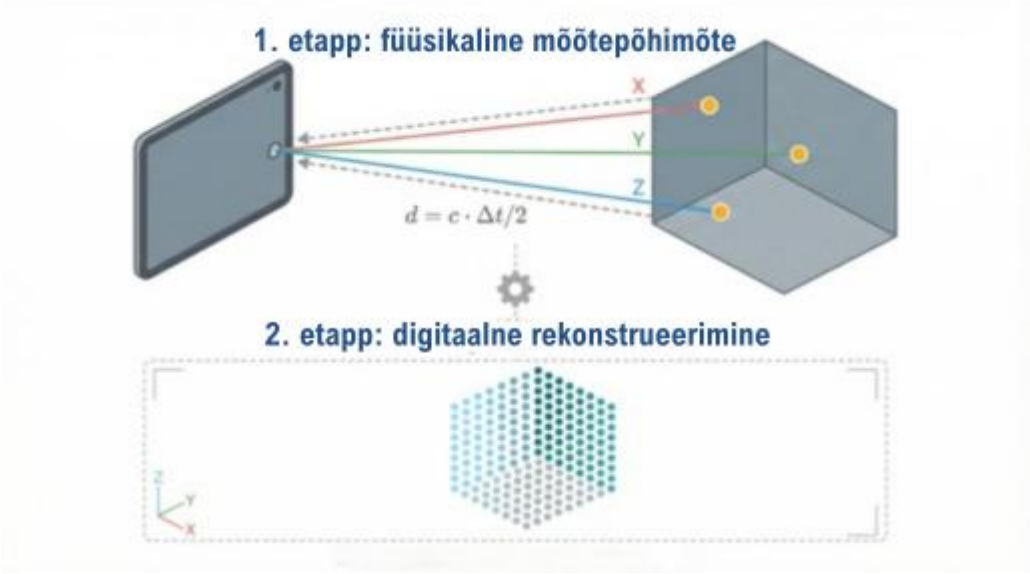
Liitreaalsus (AR) paikneb reaalsuse–virtuaalsuse spektril lähemal füüsilisele keskkonnale. See tähendab, et digitaalne teave kuvatakse arvutustehnoloogia abil reaalajas otse kasutaja vaates olevale füüsilisele keskkonnale. Tööohutuse seisukohalt on oluline, et kasutaja perifeerne nägemine ja ruumiline ohuteadlikkus säilivad täielikult. Seetõttu peetakse liitreaalsust ohutuks ja väga sobivaks kasutamiseks aktiivsetel, pidevalt muutuvatel ehitusobjektidel. Praktilise näitena saavad töötajad LiDAR-sensoriga varustatud tahvelarvuti abil kuvada enne paigaldust digitaalseid MEP-süsteeme täpselt joondatuna füüsiliste laetaladega.

Seevastu virtuaalreaalsus (VR) paikneb reaalsuse–virtuaalsuse kontiinumi teises otsas, täielikult sünteetilise keskkonna poolel. Virtuaalreaalsus varjab füüsilise keskkonna täielikult ning ümbritseb kasutaja digitaalselt loodud tehisruumiga. Kuna virtuaalreaalsus (VR) isoleerib kasutaja visuaalselt vahetutest ja ettearvamatutest füüsilistest ohtudest, näiteks lahtistest tööriistadest, ohtlikest materjalidest ja liikuvast rasketehnikast, on virtuaalreaalsuse kasutamine rangelt piiratud objektiväliste või kontrollitud keskkondadega. Tüüpilised ohutud kasutuskohad on ehitusobjekti kontorikonteiner, spetsiaalne koolitusruum või kliendi ettevõtte nõupidamisruum.

2.2 Toimemehhanism: kuidas mobiilne liitreaalsus (AR) tajub reaalsust

Mobiilse liitreaalsuse laialdane kasutamine ehitusvaldkonna VKE-des on suuresti tingitud LiDAR-tehnoloogia miniaturiseerimisest. Traditsiooniliselt kasutati LiDAR-sensoreid kallites, statiivile kinnitatavates mõõdistusseadmetes, kuid tänapäeval on need integreeritud otse tarbijaklassi tahvelarvutitesse, näiteks iPad Pros seadmetess.

Õppeotstarbelise selguse huvides tuleb märkida, et LiDAR toimib lennuaja põhimõttel (*Time of Flight*, ToF). Skanner saadab kiiresti ümbritsevasse füüsilisse keskkonda tuhandeid nähtamatuid infrapunavalguse impulsse sekundis. Kui valgusimpulss tabab füüsilist objekti – näiteks betoonseina, puitkarkassi posti või ehitusprahihunnikut –, peegeldub see tagasi seadme spetsiaalsesse protsessorisse. Kuna valguse kiirus on konstantne, arvutab seadme spetsiaalne arvutusprotsessor täpse aja, mis kulub igal footonil sensorist väljumiseks, objektilt tagasi peegeldumiseks ja sensorisse naasmiseks.



Joonis 2. LiDAR-i lennuaja (ToF) mehhanism

2.3 VKE-de tänapäevane riistvaramaastik

Sellest funktsionaalsest ja tehnoloogilisest jaotusest tulenevalt jaguneb tänapäevane VKE-de riistvaramaastik sisuliselt kaheks.

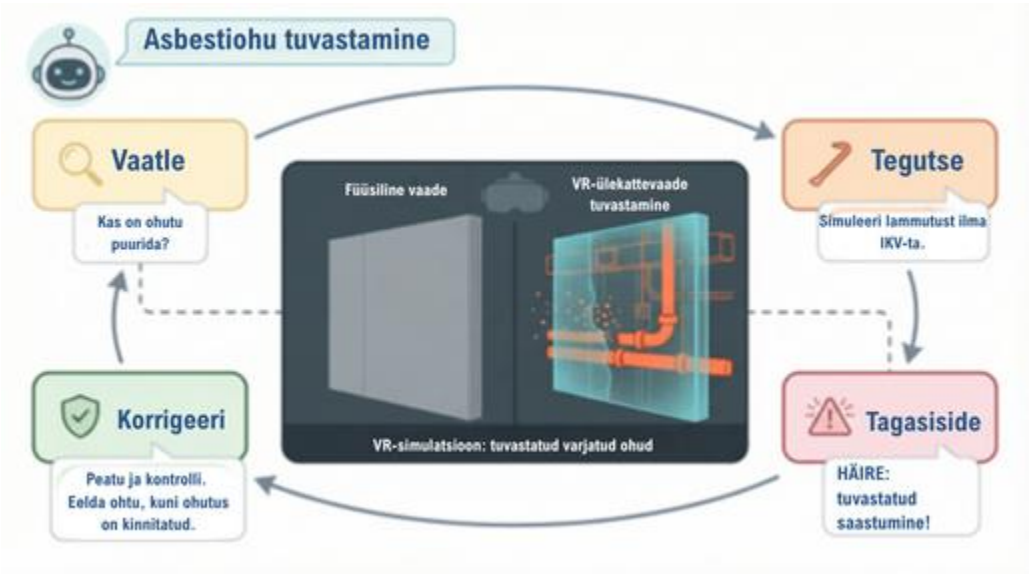
Mobiilne liitreaalsus (AR) (kasutamine ehitusobjektil): põhineb peamiselt sellistel seadmetel nagu iPad Pro ja integreeritud LiDAR-sensoriga kõrgema klassi nutitelefonid. See toimib peamise vastupidava töövahendina ehitusobjektil tehtavate erialatööde koordineerimiseks, kiireks ruumiliste konfliktide tuvastamiseks (*clash detection)* ning kliendiga ehitusobjektil tehtavateks esmasteks objektiülevaatusteks.

Eraldiseisev virtuaalreaalsus (VR) (kasutamine väljaspool ehitusobjekti): põhineb sisseehitatud jälgimissüsteemiga juhtmevabadel peakomplektidel, näiteks Meta Quest 3 peakomplektil. Seda riistvara kasutatakse peamiselt objektivälistes rakendustes, mis nõuavad sügavat immersiooni, sealhulgas vahetut kogemust pakkuvates ohutuskoolituse moodulites ja ehituseelsetes põhjalikes projektlahenduse ülevaatustes.

3. Virtuaalreaalsus (VR) ohutuskoolituses

Traditsioonilised ohutuskoolituse meetodid tuginevad sageli passiivsetele meediumidele, näiteks slaidiesitlustele ja tööprotseduure tutvustavatele videotele. Need lähenemisviisid aktiveerivad semantilist mälu, mis hõlmab faktiteadmiste meenutamist. Empiirilised uuringud näitavad, et kuu aega pärast selliseid koolitusi on kriitiliste ohutusprotseduuride meeldejätmise määr sageli alla 20%.

Virtuaalreaalsus muudab oluliselt seda õppimisparadigmat. Tekitades psühholoogilise kohalolutunde (*presence*), aktiveerib virtuaalreaalsus episoodilise mälu – kognitiivse süsteemi, mis kodeerib läbielatud kogemusi mällu. Seetõttu tekitab tellingutelt kukkumise simuleerimine virtuaalreaalsuses ajus neuroloogilise aktiivsuse, mis on funktsionaalselt sarnane tegeliku kukkumise kogemisel tekkiva aktiivsusega. Selline kogemuslik õppimine annab märgatavalt paremaid tulemusi. Valdkonna analüüsid näitavad, et virtuaalreaalsusel põhineva ohutuskoolituse järel võib meeldejätmise määr ulatuda 90%-ni (PwC, 2022). Lisaks on õppijate enesekindlus ohtude tuvastamisel ja neile reageerimisel simuleeritud hädaolukordades 275% suurem (PwC, 2022).



Joonis 3. Virtuaalreaalsuse ohusimulatsioon – asbest

Renoveerimisprojektides on üks oluline rakendus asbesti sisaldavate materjalide (ACM-ide) tuvastamine ja käsitlemine. Enne 1980. aastaid ehitatud hoonete renoveerimisel tuleb sageli tegeleda nende varjatud ohtudega. Virtuaalreaalsuse (VR) simulatsioonis harjutavad töötajad kahtlaste materjalide tuvastamist kontekstipõhiste visuaalsete tunnuste abil, näiteks teatud mõõduga põrandaplaatide või tekstuursete laeviimistluste järgi. Oluline on, et kui töötaja simuleerib materjale purustavaid lammutustöid ilma nõuetekohaste saaste leviku tõkestamise protseduurideta, visualiseerib VR-keskkond saastumisjuhtumi kohe. Muidu nähtamatud kiud muutuvad nähtavaks helendavate osakestena, mis levivad kogu simuleeritud ruumis. Selline vahetult tajutav tagasiside aitab töötajatel omaks võtta ettevaatliku „eelda ohtu“ põhimõtte juba enne tegelike lammutustööde alustamist ehitusobjektil.

Teine oluline teema käsitleb piiratud ligipääsuga ruumi sisenemise ohutust. USA tööohutuse ja töötervishoiu ameti (OSHA) statistika näitab, et 60% piiratud ruumides toimunud surmajuhtumitest leiab aset siis, kui keegi püüab kannatanut päästa ilma sobiva varustuse või õhu koostise eelneva mõõtmiseta (OSHA, 2023). Virtuaalreaalsuse (VR) simulatsioonid nõuavad ranget kinnipidamist reeglist, mille kohaselt tuleb päästa ruumi sisenemata (*non-entry rescue*). Näiteks kui õppija püüab aidata kokkuvajunud töökaaslast, sisenedes simuleeritud kaevikusse või tehnilisse šahti ilma õhuseireseadme ja päästerakmeteta, lõpeb simulatsioon tulemusega „Kaks hukkunut“. See annab selge ja emotsionaalselt mõjusa õppetunni protseduuride järgimise olulisusest, ilma et töötaja puutuks kokku tegeliku füüsilise riskiga.

4. Projektlahenduse läbivaatus ja tööde koordineerimine ehitusobjektil

Renoveerimisprojektide üks levinumaid ja pikaajalisemaid probleeme on erinevus kavandatud arhitektuurilahenduse ja vananeva ehitise tegeliku teostatud olukorra (*as-built*) vahel. Ehitusinfo modelleerimise (BIM) ühendamine immersiivsete tehnoloogiatega pakub tõhusaid mehhanisme ruumilise olukorra pidevaks ja reaalajas kontrollimiseks, vähendades erinevusi oluliselt enne, kui need põhjustavad ehitusobjektil kulukaid vigu.

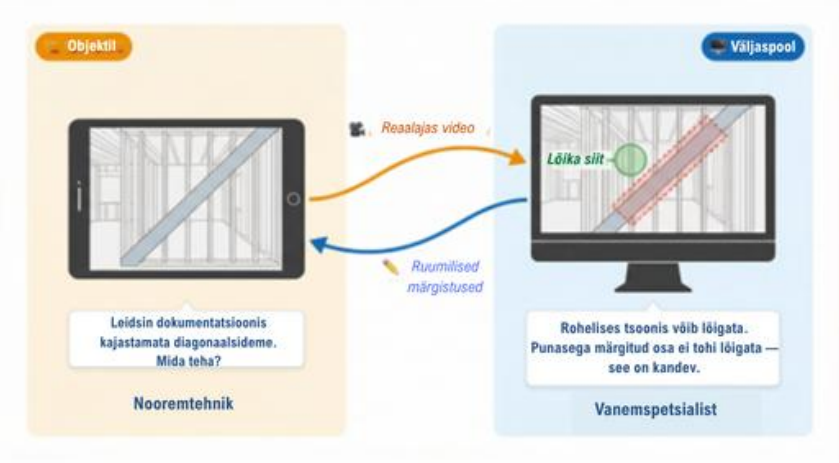
4.1 Virtuaalne ringkäik (visuaalne ruumiesitlus)

Enne füüsiliste lammutustööde alustamist on oluline pakkuda kliendile ja teistele sidusrühmadele võimalust liikuda virtuaalreaalsuses kavandatavas renoveeritud ruumis ringi, et nad saaksid anda projektile objektiivse ja teadliku, visuaalsel kogemusel põhineva heakskiidu. Virtuaalne ruumiesitus võimaldab osapooltel interaktiivselt hinnata keerukaid ruumilisi mõõtmeid, loomuliku valguse ja tehisvalguse mõju ning kavandatud viimistlusmaterjalide omavahelist koostoimet.

Selline ennetav ülevaatus vähendab oluliselt projekti käigus esitatavaid kulukaid muudatustellimusi, mis tekivad sageli siis, kui mittespetsialistid tõlgendavad 2D-arhitektuurijooniseid esteetiliselt või ruumiliselt valesti. Kui klient saab virtuaalselt läbida köögisaare ja siseseina vahemaa, põhineb tema hilisem heakskiit märksa kindlamal ruumilisel ettekujutusel.

4.2 „Näe-mida-mina-näen“ (SWIS) – kaugjuhendamine

Liitreaalsus parandab SWIS-lahenduste abil märkimisväärselt kaugjärelevalve-, mentorlus- ja kvaliteedi tagamise protsesse. Kui vähem kogenud tehnik avastab ehitusobjektil karkassi ehitamise käigus keeruka konstruktsioonilise kõrvalekalde – näiteks dokumenteerimata ja potentsiaalselt kandva diagonaalsideme –, ei pruugi tavapärased suulised või staatilistele fotodele tuginevad suhtlusviisid olla piisavad olukorra ohutuks hindamiseks.



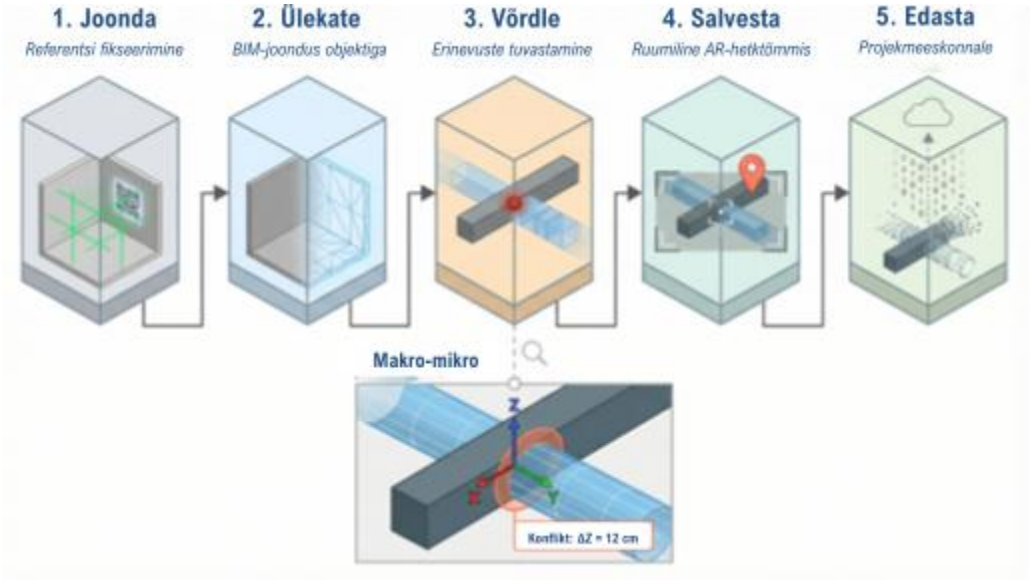
Joonis 4. „Näe-mida-mina-näen“ (SWIS) kaugjuhendamise arhitektuur

SWIS-i kaudu loob tehnik liitreaalsust toetava tahvelarvuti või kantava peakomplekti abil suure läbilaskevõimega reaalajas ühenduse. Objektist eemal viibiv kogenud töödejuhataja, kes sageli jälgib olukorda ettevõtte peakontorist, saab reaalajas esimeses isikus stereoskoopilise vaate konstruktsioonilisest kõrvalekaldest. Tahvelarvuti ruumilise ankurdamise tehnoloogiate (nt SLAM-i või LiDAR-põhise sügavuskaardistuse) abil saab objektijuht lisada reaalajas digitaalseid märkusi tehniku vaateväljale. Näiteks saab objektijuht piiritleda ohutu mehaanilise lõikamise ala, joonistada noole, mis näitab torustiku õiget paigaldustrassi, või ringiga tähistada ohuallika. Oluline on, et digitaalsed märkused ei ole lihtsalt tasapinnalised kujutised 2D-ekraanil, vaid püsivad kasutaja seadmes ruumiliselt füüsilisse keskkonda ankurdatuna, võimaldades probleemi kiiresti ja ühemõtteliselt lahendada ilma, et objektijuht peaks objektile kohale sõitma.

4.3 „Röntgennägemine“ konfliktide tuvastamisel (*clash detection*)

Võib-olla kõige mõjukam liitreaalsuse (AR) rakendus aktiivsetel renoveerimisobjektidel on nn „röntgennägemine“ ehk võimalus kuvada tehnosüsteemide digitaalseid BIM-mudeleid ruumilise ülekattena otse füüsilisele keskkonnale – näiteks keerukaid kütte-, ventilatsiooni- ja kliimasüsteemide kanalivõrke, tulekustutussüsteeme või lähestikku paiknevaid torustikke – otse füüsilise keskkonna peale. See tehnoloogia võimaldab ruumilisi konflikte ennetavalt tuvastada – ehitusvaldkonnas nimetatakse neid tavaliselt ruumilisteks konfliktideks *(clash)* – juba aegsasti enne füüsilise paigalduse algust.

Analüüsimiseks kasutatakse ehitusvaldkonnas väljakujunenud, selgelt struktureeritud viieetapilist töövoogu: 1. Joondamine (*align*): töötaja joondab digimudeli füüsilise referentspunktiga. Seda tehakse sageli staatilise visuaalse markeri abil, näiteks skaneerides kõrge kontrastsusega QR-koodi, mis on täpselt kinnitatud teadaolevale konstruktsioonisambale või keskkonna pideva arvutusliku kaardistamise abil (SLAM). Ilma selle täpse esialgse lokaliseerimiseta on kogu järgnev ülekate matemaatiliselt vigane. 2. Ülekatte kuvamine (*overlay*): tehnosüsteemi plaan (nt elektripaigaldustorude keerukas trass) kuvatakse ruumiliselt füüsilises keskkonnas, näiteks tühja betoonpõranda või avatud karkass-seina kohal.



Joonis 5. Liitreaalsusel (AR) põhinev konfliktide tuvastamise töövoog

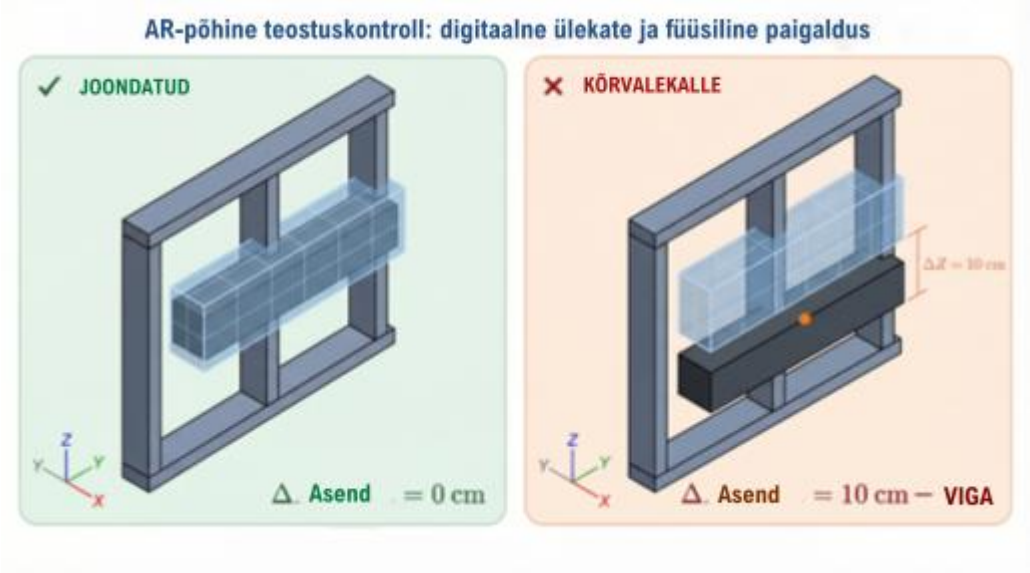
3. **Võrdle**: liigub tööalal ringi ja analüüsib ruumilisi erinevusi. Ta võrdleb digitaalset projektsiooni tegeliku füüsilise olukorraga – näiteks olukorraga, kus dokumenteerimata ja kaardistamata füüsiline terastala lõikub digimudelis kavandatud ventilatsioonikanaliga. 4. **Jäädvustamine (*capture*):** konflikti (*clash*) tuvastamisel jäädvustatakse tahvelarvuti abil konkreetse asukohaga seotud liitreaalsuse ruumipilt, milles dokumenteeritakse samas kaadris nii füüsiline takistus kui ka sellega konfliktis olev digimudeli element. 5. **Probleemi edastamine (*issue*):** põhjalik visuaalne tõendusmaterjal seotakse terviklikus

BIM-mudelis automaatselt täpsete ruumikoordinaatidega ning edastatakse otse inseneri- või projekteerimismeeskonnale. See vahetu tagasisideahel võimaldab süsteemi geomeetria digitaalset ümber projekteerida, nii et see vastab ehitusobjektil valitsevatele tingimustele. Näites integreeritakse terastala BIM-mudelisse ja korrigeeritakse ventilatsioonikanali trassi nii, et konflikti ei teki. See väldib olukorda, kus konflikti märgatakse alles siis, kui ventilatsioonitoru paigaldamine on juba alanud ja ventilatsioonikanal põrkuks terastalaga. See omakorda tagab, et materjale ei ole vaja asjatult mõõtu lõigata, paigaldada ja seejärel uuesti eemaldada üksnes terastalaga kokkupõrke vältimiseks, optimeerides ajakava ja vähendades märkimisväärselt ehitusjäätmete teket objektil.

4.4 Tööetapi lõppkontroll: digitaalne teostusjärgne vastavuskontroll

Kui konfliktide *(clash)* tuvastamine on paigalduseelne protseduur, siis liitreaalsus (AR) toimib ka olulise paigaldusjärgse kvaliteedi tagamise (QA) vahendina. Varem oli keeruka karkass-seina või keeruka torustiku paigalduse vastavuse kontrollimine tehnilistele spetsifikatsioonidele töömahukas ja vigaderohke käsitsi mõõtmine.

Sama liitreaalsuse riistvara abil, mida kasutatakse konfliktide (*clash*) tuvastamiseks, saab tööetapi lõpus teha digitaalse teostusjärgse vastavuskontrolli (*Digital As-Built Check)*. Enne kui kipsplaadipaigaldajad saabuvad seinu sulgema, varjates jäädavalt MEP-süsteemid, liigub töödejuhataja tahvelarvutiga objektil ringi. Tahvelarvutis kuvatakse heakskiidetud arhitektuurimudel ruumilise ülekattena äsja paigaldatud torudele ja elektrikarpidele. Seega, kui torustiku paigutus erineb heakskiidetud skeemist näiteks 10 cm võrra, on see ekraanil kohe nähtav ülekatte nihkena („topelnägemisena“). Karkassi saab kohe parandada, enne kui järgmise eriala töötajad vea seina sisse sulgevad. Selline visuaalne kontroll on vaieldamatu tõend selle kohta, et töövõtja teostas töö täpselt spetsifikatsioonide kohaselt, ning sellest kujuneb objekti omanikule kaasaegne digitaalne üleandmisdokumentatsioon.



Joonis 6. Digitaalne teostusjärgne vastavuskontroll

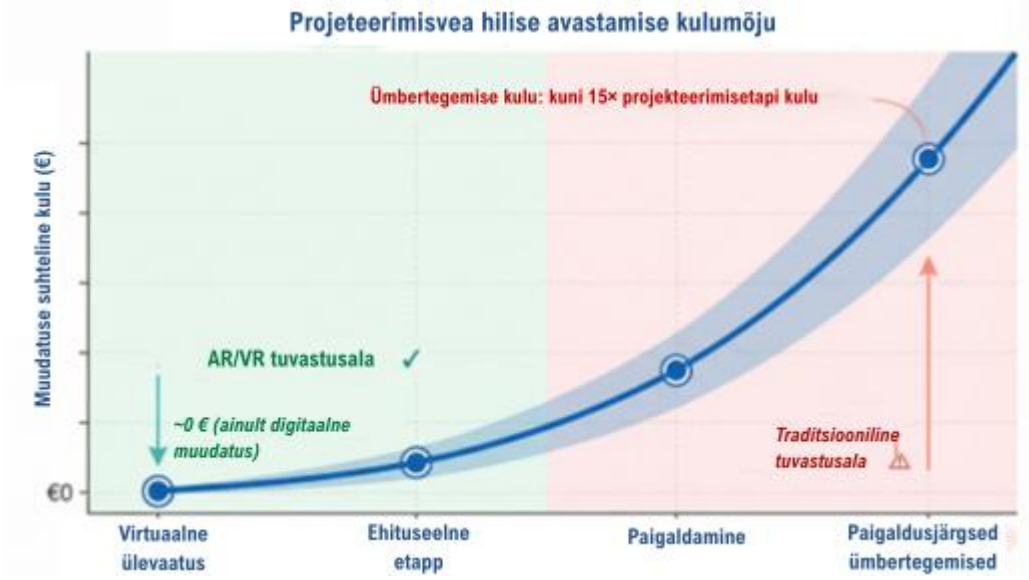
5. Investeeringutasuvus (ROI) ja tasuvusanalüüs

Väikese kasumimarginaaliga VKE-de puhul tuleb immersiivseid tehnoloogiaid hinnata kapitaliinvesteeringuna, mis annab mõõdetavat rahalist tulu. Renoveerimisprojektides on liit- ja virtuaalreaalsuse investeeringutasuvuse peamine allikas tööde ümbertegemise vältimine (*avoided rework*).

Ehitusvigade majanduslik mõju on väga ebasümmeetriline: mida hiljem viga avastatakse, seda suuremad on selle parandamise kulud. Valdkonna analüüside järgi moodustab tööde ümbertegemine keerukates renoveerimisprojektides tavaliselt 5–15% projekti kogukuludest (Dodge Data & Analytics, 2021). Kui projekteerimisviga avastatakse virtuaalreaalsuse (VR) ülevaatuse käigus enne ehituse algust, on selle parandamise kulu praktiliselt tühine — enamasti piisab lihtsast digitaalsest muudatusest,

mis nõuab üksnes digimudeli muutmist. Kui viga avastatakse alles pärast paigaldust, nõuab selle parandamine ulatuslikke lammutustöid ja uusi materjale ning põhjustab märkimisväärseid viivitusi. Paranduskulud suurenevad igas järgmises projektietapis märgatavalt.

Dodge Data & Analyticsi (2021) järeldusel põhinev koondanalüüs, mille kohaselt moodustavad tööde ümbertegemised 5–15% projekti kogukuludest, illustreerib paigalduseelsete konfliktide tuvastamise rahalist mõju. Keskmise suurusega renoveerimisettevõtte puhul, mille aastase projektiportfelli väärtus on 500 000 eurot, võib liitreaalsuse (AR) põhise konfliktide tuvastamise abil vältida tööde ümbertegemist ja hoida kokku 25 000–75 000 eurot. Kui võrrelda seda tavapärase investeeringuga mobiilse liitreaalsuse (AR) riistvarasse ja ettevõtetele mõeldud tarkvara litsentsidesse (ligikaudu 6000 eurot ühe tippklassi seadme ja üheaastase tarkvaratellimuse eest), võib isegi ühe suurema konflikti vältimine katta peaaegu kogu liitreaalsusse tehtud investeeringu maksumuse üheks eelarveaastaks. Kuigi tööde ümbertegemise kulud erinevad oluliselt sõltuvalt ehituserialast ja projekti keerukusest, illustreerib see arvutus ruumiliste konfliktide varajase tuvastamise põhimõttelist majanduslikku eelist võrreldes paigaldusjärgse parandamisega.



Joonis 7. Projekteerimismuudatuste eksponentsiaalne kulukõver

6. Kasutuselevõtu väljakutsed VKE-dele

Hoolimata tõendatavast investeeringutasuvusest (ROI) nõuab laiendatud reaalsuse (XR) tehnoloogiate kasutuselevõtt aktiivsetel renoveerimisobjektidel läbimõeldud strateegiaid, et ületada renoveerimiskeskkonnale omased ja rahalised takistused.

Kuigi tarbijaklassi riistvara muutub üha taskukohasemaks, võivad ettevõtetele mõeldud liitreaalsuse (AR) tarkvaralitsentsid tuua kaasa märkimisväärseid korduvkulusid. VKE-d peavad põhjalikult arvutama omamise kogukulu (Total Cost of Ownership, TCO), arvestades tellimustasudega, mis jäävad sageli vahemikku 1500–3000 eurot kasutaja kohta aastas. Need tegevuskulud peavad olema põhjendatud enne konkreetse tarkvara ökosüsteemi kasutuselevõttu prognoositava kokkuhoiuga, mis tuleneb tööde ümbertegemise vähenemisest.

Lisaks on renoveerimiskeskkond täppiselektroonikale olemuslikult äärmiselt ebasoodne. Õhus leviv ränidioksiiditolm tungib kiiresti aktiivjahutussüsteemidesse ning juhuslikud füüsilised löögid kahjustavad sageli tundlikke optilisi komponente, näiteks LiDAR-sensorite läätsi. Seetõttu tuleb rasketele tingimustele vastavate, IP-kaitseklassiga kaitsekorpuste kasutuselevõttu käsitleda kohustusliku infrastruktuuriinvesteeringuna, mitte valikulise lisatarvikuna.

Liitreaalsuse (AR) jälgimisalgoritmid, eriti SLAM, tuginevad matemaatiliselt visuaalsele kontrastile, et tuvastada geomeetrilisi tunnuspunkte ja ankurdada digimudelid täpselt füüsilisse keskkonda. Need algoritmid võivad kriitiliselt ebaõnnestuda keskkondades, kus puudub keskkonnavalgus, näiteks

valgustamata keldrites, või vastupidi väga peegeldavates või pimestavates tingimustes (näiteks otseses varjestamata päikesevalguses). Sellised äärmuslikud tingimused põhjustavad arvutusliku digitaalse triivi (*digital drift*), mille puhul ülekattena kuvatav mudel eraldub oma füüsilistest ruumiankrutest, mistõttu muutub tööriist kasutuskõlbmatuks.

Lisaks koormavad pidev ruumiline 3D-kuvamine ja aktiivne kaamerapildi töötlemine tugevalt mobiilseadmete riistvara. Tavalise tahvelarvuti aku tühjeneb liitreaalsuse (AR) pideval kasutamisel ehitusobjektil sageli kahe kuni kolme tunniga. Seetõttu tuleb süstemaatiliselt rakendada terviklikke toitehaldusstrateegiaid ja akude korrapärase vahetamise korda ja akude korrapärase vahetamise korda, et tagada süsteemi katkematu kasutamine ehitusobjektil kogu töövahetuse vältel.

7. Praktilised juhtumiuuringud

Et asetada eelnevates osades kirjeldatud teoreetilised, finantsilised ja protseduurilised raamistikud praktilisse konteksti, käsitletakse selles moodulis kolme tüüpilist juhtumiuuringut. Need stsenaariumid näitlikustavad liitreaalsuse (AR) ja virtuaalreaalsuse (VR) metoodikate praktilist integreerimist VKE-de tavapärastesse renoveerimistöödesse, kirjeldades probleemi tuvastamist, tehnoloogilist sekkumist ja sellele järgnevat lahendust.

1. juhtumiuuring: iteratiivne ruumiline ümberkujundamine (liitreaalsuse (AR) rakendus)

Elamu- ja äripindade renoveerimisel tekib sageli olukordi, kus klient soovib projekti käigus teha projektlahenduses muudatusi, mis võivad ootamatult osutuda vastuolus olevaks dokumenteerimata konstruktsioonide või tehnosüsteemidega. Selles juhtumiuuringus soovis klient suure keskse köögisaare märkimisväärset ümberpaigutamist, kuigi lammutustööd ja karkassi ehitamine olid juba alanud. Traditsiooniliselt kontrollitaks sellise *ad hoc* ümberpaigutuse teostatavust mõõdulindiga mõõtes ja ruumilahendust hinnanguliselt kavandades.

Heuristiliste ruumihinnangute asemel kasutas töövõtja LiDAR-skaneerimisvõimekusega iPad Pro seadet, et ankurdada kavandatud köögisaare 3D-digimudel mõõtkavas 1 : 1 füüsilisse ruumi. Mudeli vahetu kuvamine AR-ülekattena tõi objektiivselt esile kaks kriitilist praktilist konflikti. Esiteks uus paigutus rikkus ärihoonetele kehtivaid ehitusnorme ega jätnud kõrvalasuva evakuatsioonitee juurde nõuetekohast vaba läbipääsuruumi.

Teiseks kasutas töövõtja „röntgennägemise“ visualiseerimisrežiimi, kuvades digitaalse torustikuskeemi ülekattena otse olemasolevale betoonpõrandale ning näidates, et vajalikud veevarustus- ja kanalisatsioonitorud olid 10 cm võrra nihkes. Selle algse joondusvea parandamine oleks nõudnud olemasolevasse kandvasse betoonplaati soone lõikamist, mis oleks maksnud ligikaudu 2500 eurot.

2. juhtumiuuring: 4D-ehitusgraafiku terviklik visualiseerimine (virtuaalreaalsuse rakendus)

Ärihoonete renoveerimisel nõuab ajakava lühendamine sageli mitme eriala tööde intensiivset samaaegset tegemist piiratud alal. Selles stsenaariumis renoveeriti mitmekorruselist büroohoonet väga pingelise ajagraafiku alusel ning projektile kehtisid ranged leppetrahvi tingimused. Projektijuht kasutas tööde järjestuse optimeerimiseks ja töökorralduslike kitsaskohtade ennetamiseks eraldiseisvat VR-peakomplekti, et vaadelda 4D-ehitusgraafikut immersiivses keskkonnas – täiustatud arvutusmudelit, mis ühendab 3D-ruumiandmed projekti ajalise kulgemisega.

Liigutades simulatsioonis digitaalse ajajoone 6. nädalasse, sisenes projektijuht tulevase objekti 1:1 mõõtkavas virtuaalsesse kujutisse. Immersiivne esimeses isikus vaade tõi kohe esile kriitilise logistilise konflikti, mis oli projektijuhi laual olevatel traditsioonilistel paberil 2D-Gantti diagrammidel jäänud täiesti märkamata. Immersiivne simulatsioon näitas, et kipsplaadipaigaldajate meeskonna suured motoriseeritud käärtõstukid pidid töötama samas kitsas juurdepääsukoridoris, mida elektrimeeskond pidi samal ajal kasutama põhiliste kõrgepingekaablite vedamiseks. Arvutuste põhjal oleks füüsiline kokkupõrge ehitusobjektil olnud vältimatu.

Tuvastanud kriitilise kitsaskoha virtuaalkeskkonnas juba ette, muutis projektijuht logistilist ajakava ja järjestas eri tööd ümber nii, et need toimuksid kitsas juurdepääsukoridoris mitte samaaegselt, vaid järjestikku. See ennetav ja väikese kuluga digitaalne sekkumine hoidis ehitusobjektil ära mitut eriala hõlmava mitmepäevase tööseisaku ning aitas vältida viivitusi projekti kriitilisel teel.

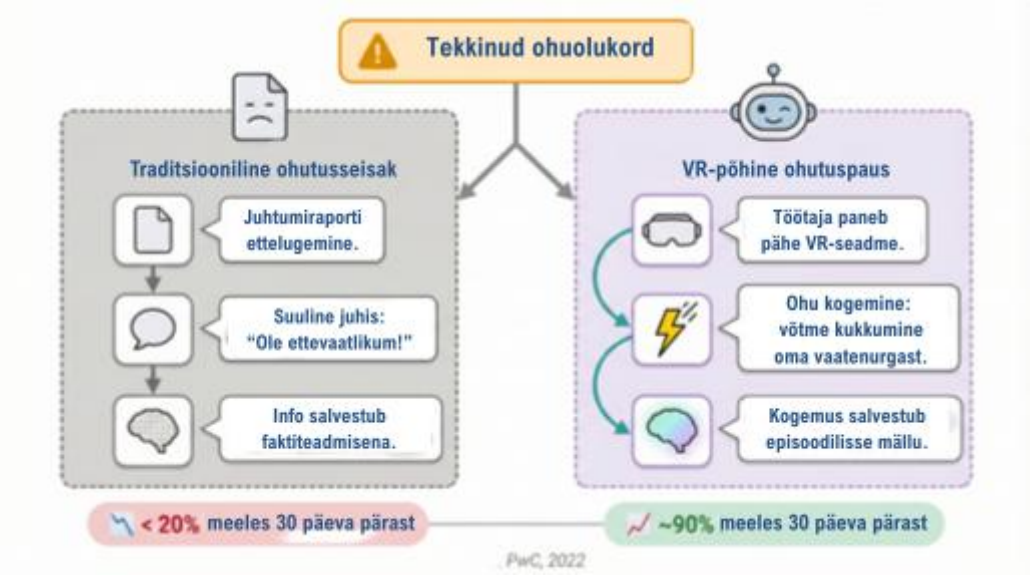
3. juhtumiuuring: intsidendijärgne ohutuspaus virtuaalreaalsuse abil

Kuigi virtuaalreaalsus (VR) on erakordselt tõhus esmasel ennetaval ohutuskoolitusel, täidab see sama olulist rolli ka intsidendijärgses algpõhjuse analüüsis ja käitumise korrigeerimisel.

Võtame näiteks linnakeskkonnas toimuva mitmekorruselise hoone fassaadirenoveerimise projekti. Väliste tellingute püstitamise ajal leidis aset tõsine napilt välditud õnnetus: nõuetekohaselt kinnitamata tööriista turvarihm andis järele ning konstruktsioonitöödel kasutatav mutrivõti kukkus kolme korruse kõrguselt, möödudes napilt all asuvast jalakäijate käiguteest. Tööstusharu tavapärane protseduur näeb ette kogu objektil kohese ohutuspausi (*safety stand-down*) – tavaliselt on see ohutusspetsialisti objekti soojakus või kontoris korraldatav erakorraline suuline manitsus, mille käigus analüüsitakse kirjalikku intsidendiaruannet. Kogemused näitavad, et sellised semantilisele mälule tuginevad suulised infotunnid jäävad ehitustöölistele pikaajaliselt väga halvasti meelde.

Ohutuspausi koolitusliku mõju suurendamiseks kasutas objekti ohutusspetsialist spetsiaalset virtuaalreaalsuse (VR) seadmekomplekti. Kirjaliku aruande ettelugemise asemel panid viieliikmelise tellingumeeskonna töötajad ükshaaval pähe Meta Questi peakomplekti. Töötajad viidi intsidendi täpsesse ja vahetult tajutavasse virtuaalsesse rekonstruktsiooni. Esimeses isikus vaatepunktist kogesid nad kõrguse füüsilist tunnet, digitaalse turvarihma ootamatut purunemist ning suure hooga langeva tööriista trajektoori ja kuulsid all toimunud kokkupõrke realistlikku ruumilist heli.

See immersiivne virtuaalreaalsuse (VR) kogemus muutis põhjalikult ohutuspausi psühholoogilist mõju. Muutes teoreetilise ohutusnõuete rikkumise episoodiliseks ja emotsionaalselt mõjusaks mälestuseks, kutsus VR-simulatsioon meeskonnas esile märkimisväärse käitumusliku muutuse. Kuna töötajad said digikeskkonnaga füüsiliselt suhelda ja kogeda nõuete eiramise tagajärgi oma ehitusobjekti riskivabas digikaksikus, järgisid nad seejärel objektil kehtestatud tööriistade kinnitamise nõudeid täielikult kuni mitmeaastase projekti lõpuni.



Joonis 8. Traditsioonilise ja virtuaalreaalsusel (VR) põhineva ohutuspausi tulemuste võrdlus

8. Ülesanded: mooduli hindamine

Vali iga küsimuse puhul mooduli sisu põhjal kõige sobivam vastus.

1. Miks peetakse liitreaalsust (AR) aktiivsel ehitusobjektil kasutamiseks ohutuks võrreldes virtuaalreaalsusega (VR)?

A) See varjab töötaja keskendumise parandamiseks täielikult füüsilise keskkonna.
B) See säilitab kasutaja perifeerse nägemise ja ruumilise ohutaju.
C) See tugineb üksnes semantilisele mälule, mitte episoodilisele mälule.
D) See ei vaja töötamiseks akut.

2. Milline psühholoogiline mehhanism aitab ületada „usalduslõhet“, võimaldades kasutajatel mõista digitaalselt kujutatud ruumi mõõtkavas 1:1 ilma, et oleks vaja 2D-joonist peas ruumilisena ette kujutada?

A) Kognitiivne mahalaadimine
B) Semantiline meenutamine
C) Visuaalse ruumiesitluse triiv
D) Digikaksiku ankurdamine

3. Milline tehnoloogia võimaldab mobiilseadmel kaardistada ümbritsevat keskkonda reaalajas, arvutades infrapunavalguse impulsside lennuaja (*„Time of Flight“*)?

A) SLAM
B) SWIS
C) LiDAR
D) HMD

4. Traditsiooniline ohutuskoolitus aktiveerib semantilist mälu (faktiteadmiste meenutamine). Millist tüüpi mälu aktiveerib virtuaalreaalsus (VR), et saavutada ligi 90-protsendiline meeldejätmise määr?

A) Lühiajaline mälu
B) Lihasmälu
C) Episoodiline mälu
D) Kajamälu

5. Mida tähendab lühend SWIS ehitusobjekti kaugjärelevalve kontekstis?

A) Ruumilise töövoo integreerimise süsteem
B) Objektil töötaja interaktiivne simulatsioon
C) Näe-mida-mina-näen (*See-What-I-See*)
D) Ohutushoiatuste infosüsteem

6. Miks on AR-il põhineva viieetapilise konfliktide tuvastamise töövoo esimene, joondamise (align) etapp arvutuslikult kriitilise tähtsusega?

A) See tellib objekti jaoks automaatselt uued materjalid.
B) See tagab digitaalse BIM-mudeli matemaatiliselt täpse joondamise füüsiliste ruumiliste lähtepunktidega.
C) See saadab ruumilise konflikti lõpparuande projekteerimismeeskonnale.
D) See arvutab tegevuse investeeringutasuvuse (ROI).

7. Millises projektietapis tuleks ideaaljuhul teha AR-il põhinev digitaalne teostusjärgne (*Digital As-Built Check*) vastavuskontroll?

A) Kliendile pakkumise koostamise algusetapis.
B) Enne füüsiliste lammutustööde algust.
C) Tööetapi lõpus, vahetult enne MEP-süsteemide jäädavat kipsplaadi taha sulgemist.
D) Alles pärast projekti lõplikku üleandmist tellijale.

8. Milline on mooduli järgi peamine majanduslik tegur, mis põhjendab immersiivsete tehnoloogiate investeeringutasuvust VKE-des?

A) Tööde ümbertegemise vältimine ja ajakava optimeerimine.
B) Turundus- ja reklaamikulude vähendamine.
C) Põhimaterjalide, näiteks saematerjali ja betooni, maksumuse vähendamine.
D) Peatöövõtja kindlustusmaksete vähenemine.

9. Mis juhtub projekteerimismuudatuste eksponentsiaalse kulukõvera järgi siis, kui ruumiline konflikt avastatakse paigaldustööde käigus, mitte projektlahenduse virtuaalse läbivaatuse ajal?

A) Kulu jääb tühiseks ja piirdub ainult tarkvarauuendusega.
B) Projekti ajakava kiireneb märkimisväärselt.
C) Tellija kannab vaikimisi kogu finantsvastutuse.
D) Paranduskulud suurenevad märgatavalt raisatud tööaja ja materjalide ning vajalike lammutustööde tõttu.

10. Milline keskkonnapiirang renoveerimisobjektil põhjustab kõige tõenäolisemalt liitreaalsuse jälgimisalgoritmide (nt SLAM) rikke ja digitaalse triivi (*digital drift*)?

A) Liigne kõrgus merepinnast
B) Keskkond, kus puudub keskkonnavalgus või esineb pimestav otsene päikesevalgus.
C) Rasketehnika tekitatud tugev müra.
D) Kiire Wi-Fi-ühenduse puudumine.

Vastusevõti:

1) B 2) A 3) C 4) C 5) C 6) B 7) C 8) A 9) D 10) B

9. Kasutatud kirjandus

Moodulis esitatud empiirilised väited, statistilised mudelid ja taksonoomilised määratlused põhinevad järgmistel akadeemilistel ja tööstuslikel allikatel:

1. **Dodge Data & Analytics (2021).** *The Business Value of BIM for Owners*. SmartMarket Report.
2. **Milgram, P. ja Kishino, F. (1994).** „A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays“**.** *IEICE Transactions on Information Systems*.
3. **OSHA (2023).** *Confined Spaces in Construction: Hazards and Solutions*. Occupational Safety and Health Administration.
4. **PwC (2022).** *The Effectiveness of Virtual Reality Soft Skills Training in the Enterprise*. PricewaterhouseCoopers.
5. **Sacks, R., Eastman, C., Lee, G. ja Teicholz, P. (2018).** *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.