

Elektro-osmoosi (EOP) ja sen toiminta rakenteiden kosteuden hallinnassa

Lue, mikä on elektro-osmoosi (EOP) ja miten se auttaa hallitsemaan kapillaarista kosteutta rakenteissa. Tutustu tieteellisiin tutkimuksiin ja sertifioituihin esimerkkeihin kosteuden poiston tueksi.

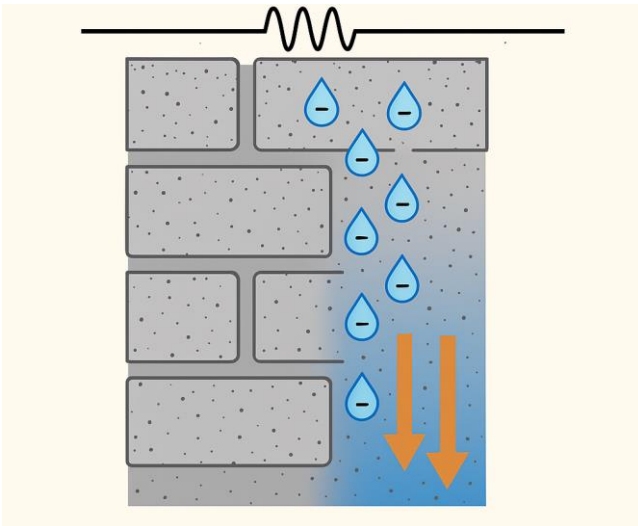
Elektro-osmoosi (EOP) on menetelmä, jota käytetään kapillaarisen kosteuden hallintaan kivirakenteissa, kuten betoni-, harkko- ja tiiliseinissä. Tämä teknologia perustuu sähköisten pulssien käyttöön, jotka muuttavat veden molekyylien polariteettia rakenteiden huokosissa, ohjaten kosteutta alaspäin. Esimerkiksi laitteet, kuten [Mursec ECO](#), hyödyntävät tätä periaatetta langattomasti ja matalataajuisilla signaaleilla. Elektro-osmoottisia kosteudenhallintamenetelmiä on sovellettu Euroopassa jo 1970-luvulta alkaen, mutta pulssimuotoinen EOP-tekniikka kehitettiin ja vakiinnutettiin käytännön sovelluksiin Yhdysvalloissa 1990-luvulla. Tällä sivulla esitetään yleiskatsaus EOP:n toimintaperiaatteesta ja siihen liittyvistä riippumattomista tutkimuksista sekä sertifioiduista esimerkeistä, jotka osoittavat menetelmän tehokkuuden.

Mikä on elektro-osmoosi (EOP)?

Elektro-osmoosi on fysikaalinen prosessi, jossa sähkövirta tai -kenttä siirtää nestettä, kuten vettä, huokoisissa materiaaleissa. Rakennusten kosteuden hallinnassa EOP käyttää matalataajuisia sähköpulsseja kääntämään veden molekyylien varausta, mikä estää kapillaarista nousua ja edistää kosteuden siirtymistä rakenteesta alaspäin kohti maata. Menetelmä on erityisen hyödyllinen vanhoissa tai kosteuserkissä rakennuksissa, joissa perinteiset kuivatusmenetelmät eivät riitä, eivät ole toteutettavissa tai ovat taloudellisesti raskaita. EOP voi toimia itsenäisesti tai osana laajempaa järjestelmää, kuten yhdistettynä salaojitukseen (patolevyt/vedeneristys) tai suolanhallintalaasteihin.

Toimintaperiaate yksinkertaisesti:

- Sähköpulssit vaikuttavat veden molekyyliin huokosissa.
- Polariteetin muutos ohjaa kosteutta alaspäin.
- Sopii kohteisiin, joissa vesipaine on kohtuullinen, mutta voi edellyttää vedenhallintaa, kuten salaojitusta, jos hydrostaattinen paine on korkea.



Kuva 1. EOP ohjaa huokosvettä alaspäin ja vähentää kapillaarista nousua.

Vesipaine (hydrostaattinen paine) ja sen merkitys

Vesipaine on hydrostaattinen paine, joka syntyy pohjaveden pinnan korkeuserosta tarkasteltavaan rakenteen kohtaan nähden.

Se lasketaan kaavalla: Vesipaine = ulkopuolisen vedenpinnan korkeus – tarkastelukohdan korkeus (positiivinen = painetta; nolla/negatiivinen = ei käytännössä hydrostaattista painetta).

Nyrkkisääntö: 1 m painekorkeus vastaa noin 9,8 kPa vesipainetta ($\approx 0,098\text{-}0,10$ bar).

Tulkinta käytännössä

- **Kohtuullinen vesipaine:** EOP katkaisee kapillaarisen nousun ja kosteustaso alenee ajan myötä.
- **Poikkeuksellisen korkea vesipaine:** EOP pitää tihkumisen kurissa, mutta kuivuminen on hitaampaa → vesipainetta kannattaa ensin alentaa vedenhallinnalla.

Esimerkkejä kellaritilanteista

- **Esimerkki 1:** Lattia $-2,2$ m; pohjavesi $-1,0$ m → painekorkeus $1,2$ m → kohtuullinen → **EOP soveltuu.**
- **Esimerkki 2:** Seinän puolivälissä $-1,2$ m; pohjavesi $-1,0$ m → painekorkeus $0,2$ m → pieni → **EOP soveltuu hyvin.**
- **Esimerkki 3:** Pohjavesi lattian alapuolella ($-2,5$ m vs. lattia $-2,2$ m) → painekorkeus $-0,3$ m → ei hydrostaattista painetta (kapillaarisuus silti kuormittaa) → **EOP soveltuu erinomaisesti.**

Hydrostatic Pressure



Kuva 2. Havainnekuva vesipaineesta (hydrostaattinen paine)

Usein kysyttyä

Poistaako EOP vanhat vauriot?

Ei. EOP ei korjaa jo syntyneitä vaurioita, vaan auttaa tulevassa kosteudenhallinnassa. Sama pätee muihinkin menetelmiin: salaojitus, patolevyt, maanpinnan muotoilu tai sadevesijärjestelmien parannus eivät poista vanhoja vaurioita, vaan ehkäisevät uusia. EOP toimii samalla periaatteella. EOP katkaisee kosteuslähteen ja parantaa rakenteiden kuivumisedellytyksiä tulevaisuudessa.

Toimiiko EOP puurakenteissa?

Ei. Menetelmä on tarkoitettu kivipohjaisiin rakenteisiin (betoni, tiili, harkko).

Kuinka nopeasti tulokset näkyvät?

Kosteuden aleneminen alkaa yleensä muutamassa viikossa, mutta selkeät tulokset ovat havaittavissa useimmiten muutaman kuukauden kuluessa.

Lopullinen kuivuminen riippuu useista tekijöistä, kuten rakenteen paksuudesta, materiaalista, lähtökosteudesta, ilmanvaihdosta ja ympäristöolosuhteista. Tyypillisesti rakenteet saavuttavat tasapainokosteuden 6–36 kuukauden aikana.

Riippumattomat tutkimukset

Elektro-osmoosi (EOP) kivirakenteiden kapillaarisen kosteuden hallinnassa

Alla kooste keskeisistä julkaisuista (laboratorio, pilotit ja kenttä). Mittarit vaihtelevat (gravimetrinen vesipitoisuus, porareikä-RH, resistiivisyys, kosteuskäyrät). Pitkä seuranta ja standardoitu mittausprotokolla ovat tärkeitä (samojen pisteiden mittaus samoina vuodenaikoina)

Jokaisessa tutkimuksessa noudatetaan samaa rakennetta: Mitä tutkittiin → Missä & milloin → Kuka → Miten (mittarit) → Tulokset (luvut + kesto) → Johtopäätös.

EOP kohdistuu kapillaariseen kosteuden nousuun. Erittäin korkeassa hydrostaattisessa paineessa kokonaisratkaisuun kuuluu usein myös vedenhallinta (salaojat anturan alapuolella, kaadot, hulevesien ohjaus).

Tiivistelmä tutkimuksista

1. ERDC TR-06-9 (USA) – betoni, lab + kenttä
2. USBR MERL-2012-10 (USA) – Trinity Dam
3. ERDC TR-02-21 (USA) – pilotit & mittaustapa
4. USACE / ERDC – WMTA-tunneli (USA)
5. Gül-moskeija (Turkki) – Buildings (MDPI) 2024
6. Desarnaud et al., ICMB21 (Belgia-NL) – mittausprotokolla
7. EMERISDA (BELSPO 2020) – menetelmäkatsaus & suositukset
8. FEAP TR 98/68 (USA 1998) – kustannus & toteutus

1. ERDC TR-06-9 (USA) – EOP Betonin kosteudenhallinnassa

Mitä tutkittiin / tavoite

Miten elektro-osmoosipulssi (EOP) vaikuttaa kapillaariseen veden kulkuun ja kosteustasoon noin 100 mm paksussa betonissa eri painekorkauksilla laboratorio-olosuhteissa. Lisäksi menetelmän toimivuus kahdessa todellisessa sulkuosassa.

Kohde & aika

Laboratorio + Lock & Dam 7 (Minnesota) ja Lock 27 (Illinois); loppuraportti 2006.

Tekijä

Yhdysvaltain armeijan insinöörijoukkojen tutkimus- ja kehityskeskus (ERDC), rakennustekniikan tutkimuslaboratorio (CERL) yhdessä geotekniikan ja rakenteiden laboratorion kanssa.

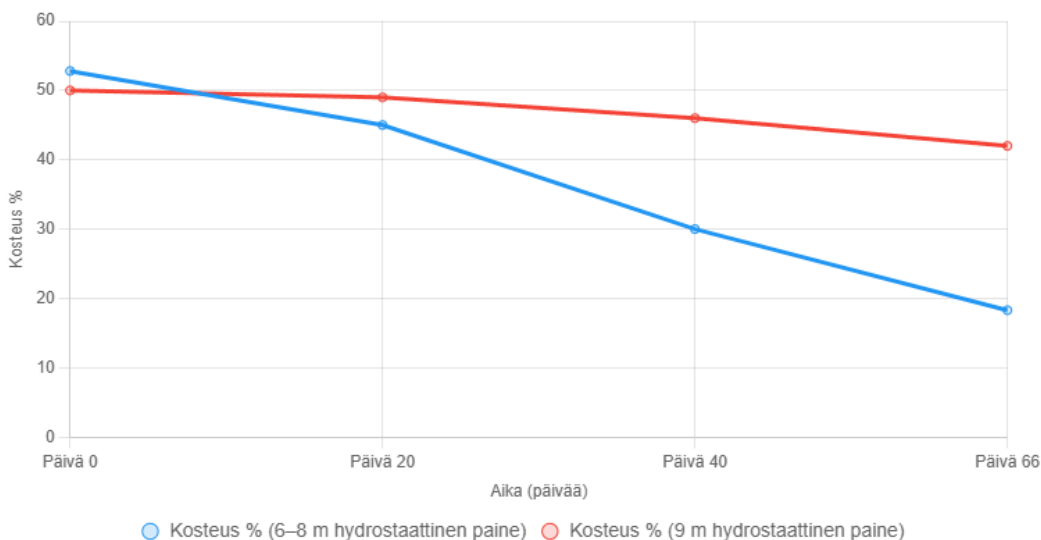
Menetelmät

Betoninäytteisiin (paksuus ~100 mm) kohdistettiin säädettäviä vesipäitä (tyypillisesti 6–9 m). Seurattiin kosteutta syvyysuunnassa sekä EOP-järjestelmän virta- ja jännitearvoja. Kentässä mitattiin pintakosteutta ja sähköisiä suureita ajan kuluessa.

Tulokset

- Laboratoriotulosten perusteella 6–8 m painekorkeudessa kosteuspitoisuus pieneni noin 65 % (52,8 % → 18,3 %) 66 vuorokauden kuluessa.
- Kenttähavainnoissa (Lock 27) mitattiin samansuuntainen kehitys: pintakosteus aleni, virta väheni ja resistanssi kasvoi, mikä on johdonmukainen indikaattori kuivumisesta.

EOP:n vaikutus betonin kosteuteen



Viivakaavio kosteudenmuutoksesta.

Johtopäätös

EOP alentaa betonin kosteustaso. Poikkeuksellisen korkeassa hydrostaattisessa paineessa EOP pysäyttää tihkun, mutta täydempi kuivuminen edellyttää usein myös vedenhallinnan parantamista (salaojat anturan alapuolelle, kaadot, hulevesien ohjaus).

Lähde: ERDC/CERL TR-06-9 (virallinen tekninen raportti)

<https://erdc-library.erdcdren.mil/items/81b728f7-7898-4ef8-e053-411ac80adeb3>

2. USBR MERL-2012-10 - Trinity Dam (USA)

Mitä tutkittiin / tavoite

EOP:n vaikutus tihkuvuodon hallintaan ja betonirakenteen kosteustasoon padon porttikammiossa.

Missä & milloin

Trinity Dam; 2012.

Kuka

U.S. Bureau of Reclamation (USBR), Materials & Engineering Research Laboratory (MERL).

Miten

Ohmin lain perusteella: vakiopotentialissa virta ↓ ja laskennallinen resistanssi ↑ = viite kosteuden alenemisesta; lisäksi visuaalihavainnot.

Tulokset (luvut + kesto)

- **2 viikkoa:** virta aleni, resistanssi kasvoi (kuivumistrendi).
- **5 viikkoa:** resistanssi $\approx 2\times$ lähtötasoon.
- **11 viikkoa:** resistanssi $\approx 2,5\times$ lähtötasoon.
- **15 viikkoa:** seinä pääosin kuiva; jäljellä olevat kosteat kohdat johtuivat ylivuotavasta tippakaukalosta (ei läpivuotoa).

Johtopäätös

Pilotti toimi suunnitellusti ja alentaa kosteutta. Suositus: laajenna käyttöä suuremmalle alueelle ja myös halkeamakohtiin.

Lähde: USBR MERL-2012-10 (virallinen tekninen raportti).

https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/env/MERL-2012-10_EOP_Report.pdf

3. ERDC TR-02-21 (USA)

Mitä tutkittiin / tavoite

Kehittää standardoitu mittausprotokolla elektro-osmoosin (EOP) vaikutusten todentamiseksi koerakennetuissa kellareissa sekä demonstroida menetelmän kyky alentaa kosteustaso betonirakenteissa. Tutkimus keskittyi sähkönjohtavuuteen, resistiivisyyteen ja kosteusmittauksiin, tavoitteena luoda luotettava tapa todentaa kosteuden muutokset pitkällä seurannalla.

Missä & milloin

ERDC/CERL, Champaign (IL), kaksi testikellaria (valubetoni + harkko), seuranta noin 9 kk: päivittäiset mittaukset; dataloggereilla 30 min välein lämpötila, RH ja EOP-virta.

Kuka

U.S. Army Corps of Engineers, Construction Engineering Research Laboratory (CERL).

Miten

- Wennerin 4-nastainen resistiivisyysmittaus seinän (50/100/180 mm) ja lattian (50/100/125 mm) syvyyksissä samoissa pisteissä.
- Porareikä-RH ja sähkönjohtavuus (EC).
- Kalibrointi: Resisttiivisyys \rightarrow %-kosteus kaavalla $y = 1708,8 \cdot x^{-0,3234}$ ($R^2 \approx 0,981$, Protimeter-pohjainen).
- Mittausvarotoimi: EOP-pulssi katkaistiin mittauksen ajaksi vääristymien välttämiseksi.
- Testikuormitus: Keinotekoinen ulkoinen vesikuorma (~1 890 l/vrk) perustan ympärillä, jotta vesitaso pysyisi vakiona ja EOP:n vaikutus erottuisi selvästi.

Tulokset

- Ilman EOP:ta rakenteeseen kertyi seisovaa vettä (~115 mm).
- Vuotokohdat (esim. seinä-lattiakulma) tiivistettiin ensin, minkä jälkeen EOP käynnistettiin – tihkuminen loppui ("weeping stopped"), vaikka ulkoinen vesitaso pidettiin korkeana. Termi "weeping stopped" tarkoittaa, että rakenteen sisäpinta lakkasi tihkumasta vettä näkyvästi.
- Resisttiivisyys kasvoi useissa syvyyspisteissä EOP-jaksoilla, mikä näkyi selvinä nousevina trendeinä kenttäkuvaajissa. Korkeampi resisttiivisyys = vähemmän huokosvettä = kuivempi materiaali.

Kosteaa betonia tai muurauksia johtaa sähköä paremmin, koska vesi toimii johtimena suolojen avulla. Kun rakenne kuivuu ja huokosveden määrä vähenee, sähkövirran kulku vaikeutuu – eli resisttiivisyys kasvaa. Toisin sanoen: mitä suurempi resisttiivisyys, sitä kuivempi rakenne. Siksi EOP:n vaikutus näkyy mittauksissa nousevana resisttiivisyyskäyränä – merkinä siitä, että rakenne kuivuu ajan myötä.

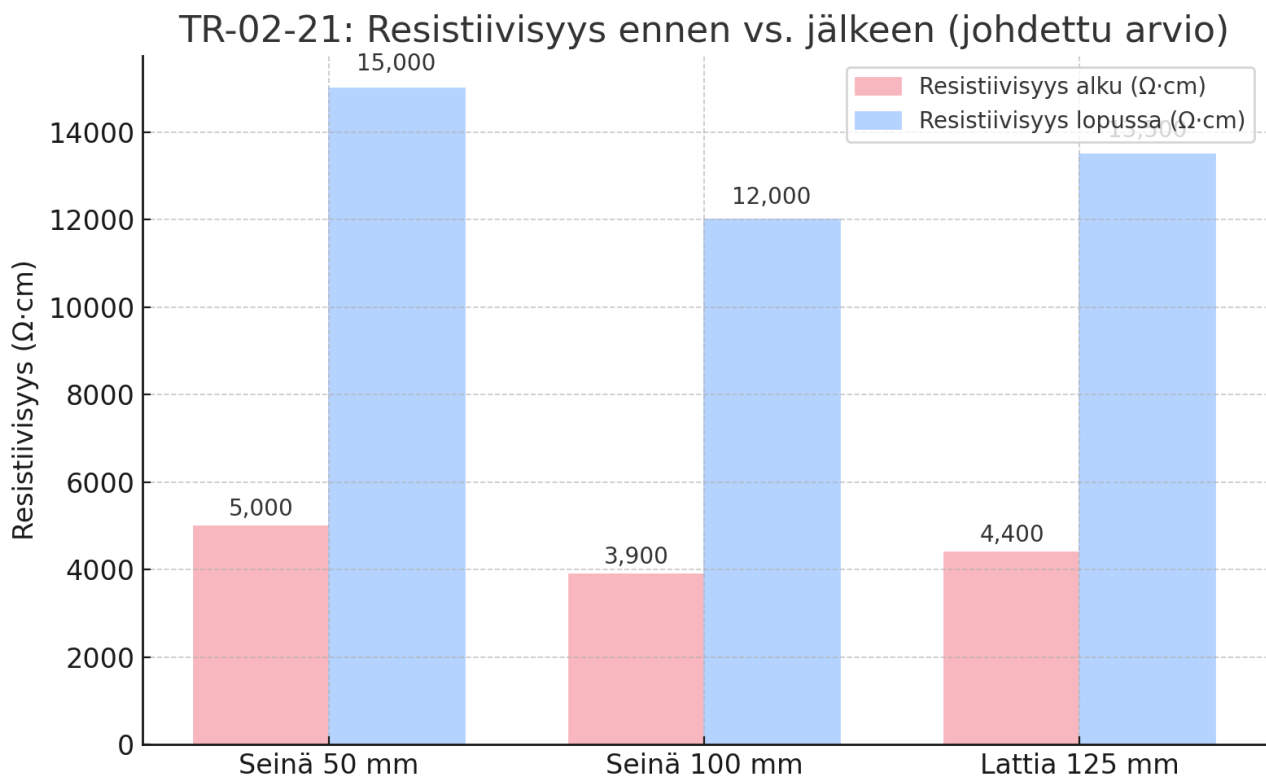
Tekninen tulkinta

Resistiivisyys (ρ , $\Omega\cdot\text{cm}$) kuvaa materiaalin kykyä vastustaa sähkövirtaa ja riippuu huokosveden määrästä, sen johtavuudesta sekä ionipitoisuudesta. Resistiivisyys määritellään kaavalla:

$$\rho = R \cdot A / L,$$

missä **R** on mitattu resistanssi (Ω), **A** virran poikkipinta-ala (cm^2) ja **L** elektrodien välinen etäisyys (cm).

EOP-jaksojen aikana virta yleensä pienenee ja resistiivisyys kasvaa (kuivumistrendi). TR-02-21:n D19–D20-kuvissa raportoidaan resistiivisyys ($\Omega\cdot\text{cm}$), ei pelkkää R:ää; siksi kaavioihin ja taulukkoon merkitään resistiivisyys. Raportissa resistiivisyys kasvoi useissa syvyyksissä 9 kuukauden seurannassa (esim. seinä 50/100/180 mm, lattia 50/100/125 mm) ja samanaikaisesti havaittiin *“weeping stopped”*.



Pylväskaavio resistiivisyyden muutoksesta ($\Omega\cdot\text{cm}$)

Mittapiste	Resistiivisyys alussa	Resistiivisyys lopussa	Arvioitu kosteuspitoisuus alussa %	Arvioitu kosteuspitoisuus lopussa %	Muutos
Seinä 50 mm	(arvion mukaan) e.g. 5 000 $\Omega\cdot\text{cm}$	15 000 $\Omega\cdot\text{cm}$	~45 % (± 3)	~28 % (± 2)	~ -38 %
Seinä 100 mm	e.g. 4 000 $\Omega\cdot\text{cm}$	12 000 $\Omega\cdot\text{cm}$	~38 % (± 3)	~22 % (± 2)	~ -42 %
Lattia 125 mm	e.g. 4 500 $\Omega\cdot\text{cm}$	13 500 $\Omega\cdot\text{cm}$	~42 % (± 3)	~25 % (± 2)	~ -40 %

(Arvot ovat johdettuja arvioita TR-02-21-raportin resistiivisyyskäyristä ($\Omega\cdot\text{cm}$) ja kalibroitikaavasta; ne eivät ole suoria taulukkoarvoja. Kuvista tehty lukutarkkuus voi aiheuttaa pieniä eroja.)

Johtopäätös

EOP-jaksojen aikana rakenteen kosteustaso alenee: kosteus laskee ja resistiivisyys ($\Omega\cdot\text{cm}$) kasvaa useissa syvyyspisteissä, vaikka ulkoinen vesikuorma pidetään keinotekoisesti korkeana. Raportti määrittelee samalla mitattavan protokollan (pulssi pois päältä mittauksen ajaksi, samat pisteet ja vuodenajat), jolla vaikutus voidaan todentaa luotettavasti. **EOP osoittautui tehokkaaksi noninvasiiviseksi menetelmäksi kosteuden hallintaan, erityisesti yhdistettynä vuotojen tiivistämiseen.**

Lähde: Virallinen ERDC/CERL tekninen raportti (TR-02-21)

<https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA419184.pdf>

4. USACE/ERDC – WMTA-tunneli (USA)

Mitä tutkittiin / tavoite

EOP:n kenttävaikutukset betonitunneleissa; seinärakenteen kosteuden kehitys ajan myötä.

Missä & milloin

Washington Metropolitan Area Transit Authority (WMTA); asennus 2003, seuranta 12 kk

Kuka

U.S. Army Corps of Engineers / ERDC.

Miten (mittarit)

Seinän kosteusindeksi ~50 mm syvyydessä, samat mittapisteet ennen-jälkeen.

Tulokset

- Kosteusindeksi pieneni ~70 % noin 12 kuukaudessa.

Johtopäätös

EOP soveltuu betonitunneleihin ja -tiloihin, kun halutaan alentaa rakenteen kosteustasoa ilman ulkopuolisia kaivutöitä.

Lähde: ERDC – Electro-Osmotic Pulse Technology (virallinen faktasivu/koonti)

<https://www.erdcl.usace.army.mil/Media/Fact-Sheets/Fact-Sheet-Article-View/Article/476725/electro-osmotic-pulse-technology/>

5. Gül-moskeija, Istanbul (Turkki) – *Buildings* (MDPI) 2024

Mitä tutkittiin / tavoite

EOP-laitteen vaikutus historiallisen muurauksen (tiili/kivi) kapillaariseen nousuun ja kosteustason alenemaan.

Missä & milloin

Gül-moskeija, Istanbul; seuranta ~9 kk; julkaistu 2024.

Kuka

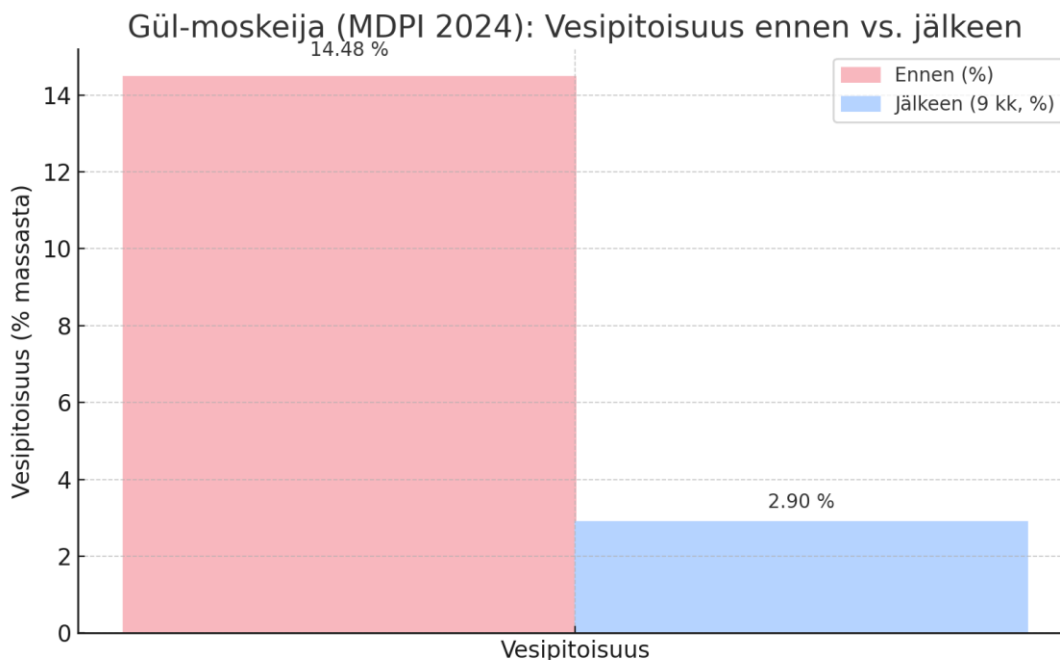
Koca et al., Konya Technical University ym.

Miten (mittarit)

Vesipitoisuus % massasta (gravimetrisen mittaus) ennen–jälkeen.

Tulokset (luvut + kesto)

14,48 % → 2,90 % noin 9 kuukaudessa. Mallinnuksen mukaan kosteuden lasku alentaa lämmönjohtavuutta (pienentää lämpöhäviöitä).



Pylväskaavio vesipitoisuuden muutoksesta.

Johtopäätös

EOP alentaa historiallisten muurattujen rakenteiden kosteustasoja; parhaaseen tulokseen päästään, kun ulkoiset vesireitit (pohjavesi, sade) ovat hallinnassa.

Lähde: Vertaisarvioitu tiedelehtiartikkeli (*Buildings*, MDPI)

<https://www.mdpi.com/2075-5309/14/5/1460>

6. Desarnaud et al., ICMB21 (Belgia–NL)

Mitä tutkittiin / tavoite

Standardoitu mittausprotokolla EOP:n (ja muiden menetelmien) vaikutusten arviointiin historiallisissa muuratuissa rakenteissa.

Missä & milloin

Belgia–Alankomaat; ICMB21, 2021.

Kuka

Belgian kuninkaallinen kulttuuriperintöinstituutti & Delftin teknillinen yliopisto (TU Delft).

Miten (mittarit)

Sama vuodenaika, samat korkeudet ja syvyydet ennen–jälkeen; seuranta ≥ 12 kk.

Tulokset

Abstraktissa ei kerrota tarkkoja tuloksia, mutta:

- Testit tuottivat "tärkeitä löydöksiä kulttuuriperintöyhteisölle"
- Tulokset liittyvät näiden tekniikoiden todelliseen tehokkuuteen

Johtopäätös

Tulokset vaihtelevat kohteittain; kausivaihtelu voi peittää vaikutuksen. **Pitkä ja standardoitu seuranta tuottaa luotettavan arvion** (erityisen tärkeää muuratuissa, historiallisissa rakenteissa).

Lähde: Konferenssijulkaisu / mittausohjeistuksen kehitys (ei varsinainen kenttä-TR)

<https://www.scienceopen.com/hosted-document?doi=10.14293%2FICMB210086&utm>

7. EMERISDA – Final Report (BELSPO, 2020)

Mitä tutkittiin / tavoite

Arvioida eri menetelmien (mm. elektro-osmoosi) vaikuttavuutta kapillaarisen kosteuden hallinnassa historiallisissa ja nykyrakennuksissa; koota mittaus- ja arviointikäytäntö sekä päätöspuu menetelmävalinnan tueksi.

Missä & milloin

Belgia-vetoisen BRAIN-be-ohjelman hanke (Euroopan laajuinen aineisto); loppuraportti 2020.

Kuka

BELSPO (Belgian Science Policy Office) – EMERISDA-konsortio (mm. RCE/TU Delft, KIK-IRPA jne.).

Miten (mittarit)

Laaja kirjallisuuskatsaus, tapaustutkimukset ja mittausprotokollat (gravimetria, porareikä-RH, johtavuus/resistiivisyys, suolakartoitus). Painotus standardoidussa seurannassa (samat pisteet, samat vuodenaajat, riittävä kesto).

Tulokset (luvut + kesto)

Raportti on konsolidoitu katsaus, ei yhden kohteen koesarja: se ei anna yhtä yleispätevää prosenttilukua EOP:lle, vaan kokoaa kohdekohtaisia tuloksia ja viitteitä (esim. ICMB21, EMERISDA-case-raportit).

Suosittelun seuranta ≥ 12 kk, jotta vuodenaikavaihtelu ei peitä vaikutusta.

Menetelmävalinta olosuhde- ja rakennekohtainen: ulkoisen vesikuorman hallinta (salaojat, kaadot) parantaa onnistumisen todennäköisyyttä, elektrodikontakti ja materiaali vaikuttavat EOP-tehoon.

Johtopäätös

EMERISDA vahvistaa, että elektro-osmoosi voi olla toimiva osa kokonaisratkaisua, kun ulkoiset vesireitit on hallittu ja seuranta tehdään kurinalaisesti. Luotettava arvio edellyttää standardoitua mittausta ja pitkää seuranta; EOP:n soveltuvuus tulee arvioida kohdekohtaisesti muiden keinojen rinnalla.

Lähde (virallinen loppuraportti, PDF)

https://www.belspo.be/belspo/brain-be/projects/FinalReports/EMERISDA-BE_FinReport_def.pdf

8. FEAP TR 98/68 (USA, 1998)

Mitä tutkittiin / tavoite

Demonstroida elektro-osmoosin käytännön toimivuutta betoni/kivirakenteissa ("wet basements", maanvastaiset seinät) ja verrata kustannuksia sekä toteutettavuutta perinteisiin trench & drain -ratkaisuihin.

Missä & milloin

Yhdysvallat; Facilities Engineering Applications Program (FEAP), raportti 1998.

Kuka

U.S. Army Corps of Engineers (USACE), FEAP.

Miten (mittarit)

Kenttäkohteiden vuoto-/tihkuhavainnot, sisäolosuhteet, asennuksen kesto ja kustannusvertailu elinkaarinäkökulmasta (kaivuutyö, käyttökatkot, sisäpuolinen/negatiivinen puoli vs. ulkopuolinen korjaus).

Tulokset (luvut + kesto)

- Useissa kohteissa vuoto väheni ja sisäolosuhteet paranivat EOP-asennuksen jälkeen.
- Kenttähavaintojen mukaan EOP-toteutukset olivat merkittävästi edullisempia kuin kaivanto + salaojitus. Lisäksi sisäpuolen asennus on nopea ja katkeamaton toiminnan kannalta.

Johtopäätös

FEAP-raportin mukaan EOP on usein kustannustehokas, nopeasti toteutettava sisäpuolinen vaihtoehto etenkin, kun kaivaminen on hankalaa/kallista tai käyttökatkot tulisi minimoida. Menetelmä sopii parhaiten, kun se yhdistetään olosuhteiden hallintaan (pintavedet, kaadot, salaojat).

Lähde (virallinen FEAP-TR, PDF)

<https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA354112.pdf>