

# Tulevaisuuden vaihtoehtoiset sideaineet: alkaliaktivoidut materiaalit

**Laura Stefanini**, PhD  
Research Scientist  
VTT / Structural Materials  
laura.stefanini@vtt.fi

Artikkelissa kuvattu URBCON-projekti oli osa Laura Stefaninin väitöskirjaprojektia. Laura Stefanini valmistui filosofian tohtoriksi materiaalitieteiden alalta Sheffieldin yliopistosta Englannista viime kesänä. Väitösprojektin rahoittajana oli Interreg NWE. Lisätietoja nyt valmistuneesta projektista löytyy osoitteesta <https://vb.nweurope.eu/projects/project-search/urbcon-by-products-for-sustainable-concrete-in-the-urban-environment/>

Rakentamisen dynaamisessa maailmassa innovaatiot ovat alan tulevaisuutta muovaava voima. Ympäristönäkökohdat ja kestävä kehitys ovat yhä tärkeämpiä, joten vaihtoehtoisia materiaaleja on tulossa laboratoriosta rakennustyömaalle. Näiden innovatiivisten sideaineiden joukosta erottuvat alkaliaktivoidut materiaalit (AAM-materiaalit), jotka tunnetaan myös geopolymeereinä.

AAM-materiaalien historia ulottuu yli vuosisadan taakse. Vuonna 1895 *Jasper Whiting* yhdisti masuunikuonan ja natriumhydroksidia ja loi näin käyttökelpoisen sideaineen. Vuonna 1908 *Hans Kühl* patentoi sementin valmistuksen yhdistämällä lasikuonaa ja emäksisiä lähtöaineita, jolloin saavutettiin jo parhaaseen Portland-sementtiin verrattavissa oleva suorituskyky. Myöhemmät kehitystyöt, kuten "Purdocement" 1940-luvulla, osoittivat kuona-alkalisementtien parantuneen lujuuden. Vuonna 1965 Glukhovskyn työ laajensi aluminosilikaattien käyttöä sideaineena, ja 1970-luvulla alkaliaktivointitekniikka kehittyi edelleen.

1990-luvulta lähtien alkaliaktivointitekniikan tutkimus ja kehittäminen ovat laajentuneet nopeasti, ja siitä on tullut merkittävä tieteellinen ala. Kaupallistaminen rajoittuu kuitenkin edelleen muutamaani yrityksiin useissa maissa. Standardointi- ja sääntelytoimet

ovat käynnissä alkaliaktivointitekniikan yleisen käyttöönoton mahdollistamiseksi. AAM-materiaalit tarjoavat nykyään vähähilisen vaihtoehdon perinteiselle sementille, ja ne tarjoavat ainutlaatuisen materiaalien räätälöintimahdollisuuden raaka-aineiden ja seossuunnittelun pohjalta. AAM:n valmistuksen keskeisin reaktio on (kalsium)alumiinisilikaattimateriaalien ja emäksisen liuoksen välinen vuorovaikutus. Vaikka AAM-materiaalit ovat osoittautuneet lupaaviksi, aktivointiprosessissa käytettävän emäksisen liuoksen ympäristövaikutukset aiheuttavat huolta.

AAM-materiaalit valmistetaan pääasiassa jauhetusta masuunikuonasta (GGBFS) tai lentotuhkasta, joiden saatavuus on kuitenkin vähenemässä. Tutkijat selvittävätkin nyt erilaisia teollisuuden sivutuotteita ja jättemateriaaleja vaihtoehtoisina lähtöaineina. Tämä on tärkeää, jotta voidaan osoittaa tämän teknologian maailmanlaajuinen sovellettavuus ja sen mahdollisuudet tukea ja mullistaa rakennusteollisuutta.

Interreg NWE URBCON -hankkeen puitteissa Sheffieldin yliopistossa tutkittiin neljää erilaista teollista lähteistä peräisin olevaa jättemateriaalia sen selvittämiseksi, voidaanko niitä käyttää alkaliaktivoitujen sementtien lähtöaineina: i) viittä kaoliiniittikaivoksesta peräisin olevaa jäännössavea (Imerys, Eng-

1 Gentin portaikon yksityiskohta



1



2

lanti); ii) terästehtaan happipohjaisen uunin (BOF) kuonaa (ArcelorMittal, Belgia); iii) valokaariuunin (EAF) ruostumattoman teräksen kuonaa (Orbix, Belgia); ja iv) kuparikuonaa (CS) jalostuslaitoksesta (Arubis, Belgia).

- i) Savilla on nyt valtava merkitys rakennus- alalla mahdollisena sementin korvaajana, mutta myös AAM-materiaalien esiasteena, ja jäännössavien hyödyntäminen on entistä tärkeämpää. Oikean saven valinta riippuu mm. sen hiukkasmorfologiasta ja amorfisten faasien osuuksista, jotka riippuvat alkuperäisestä kaoliniittipitoisuudesta. Sekoitamalla kalsinoitua jätesavea GGBFS:n kanssa ja optimoimalla seossuunnittelua on tuloksena seos, jonka huokoisuus on vähäistä ja jonka lopullinen puristuslujuus on vaikuttava 70 MPa 28 vuorokauden iässä. Se sopii erinomaisesti korkealujuuksiin sovelluksiin.
- ii) BOF-kuona -alkaliaktivointi tuotti mielenkiintoisia tuloksia. Materiaalin vanheneminen ulkovarastoinnin aikana muutti sitä runsaasti portlandiittia ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) sisältäväksi. Tätä voidaan käyttää kiihdyttimenä jauhettua masuunikuonaa (GGBFS) sisältävien sekoitusten kanssa, mikä mahdollistaa ympäristöystävällisten aktivaattoriliuosten, kuten natriumsilikaatin, käytön.

iii) Tulipesäkuona on yksi tulevaisuuden keskeinen resurssi. Kun teräksen tuotannossa siirrytään kestävämpiin tuotantotapoihin, korvaa EAF-kuona hitaasti GGBFS:n. Tulipesäkuonien reaktiivisuus on heikompaa kuin GGBFS:n, mutta niiden reaktiivisuutta voidaan parantaa alkaliaktivoitintekniikan avulla. EAF-kuonan sisältämät mahdolliset haitalliset ainekset kuitenkin säilyvät niissä kapseloituna.

iv) Kuparikuona (CS) on sisältämänsä huomattavan amorfisen rautasilikaattifaasinsa vuoksi erittäin reaktiivinen emäksisissä väliaineissa. GGBFS:n kanssa sekoitettuna se saa aikaan viivästyneen reaktiokinetiikan, mikä saa aikaan paremman työstettävyyden ja vaikuttavamman varhaislujuuden. Tämä tekee siitä arvokkaan esiasteen alkaliaktivoituja sementtejä varten.

v) Vaikka kalsiumaluminaattisementit (CAC) eivät ole sellaisenaan sallittuja kantavissa sovelluksissa, niitä voidaan käyttää hyödyllisinä lisäaineina uusissa sideaineissa. "Hybridisideaineiden" valmistuksessa CAC:ä lisättiin alkaliaktivoituu seokseen aktivaattorin annostuksen vähentämiseksi ja varhaislujuuden parantamiseksi. Tämä johti kuitenkin reaktiokinetiikan yllättävään viivästyneeseen, jonka monimutkaisen dynamiikan selvittämiseksi tarvitaan lisätutkimuksia.



3



4

2 Rotterdamin jalankulkusilta

3 Halkeamakuvio taivutuskuormituksen alaisena

4 Rotterdamin sillan kansen asentaminen

### Alkaliaktivoitunut innovaatiot kaupunkirakentamisessa

Gentin kaupungin johtamassa konsortiossa, johon kuuluivat Sheffieldin yliopisto, TUDelft, UGent, RPTU Kaiserslautern, ResourceFull, VDZ, Imerys ja muut URBCON-hankkeen yhteistyökumppanit, toteutetun tutkimuksen tuloksena kehitettiin alkaliaktivoitujen betonien perhe. Pääpaino oli perinteisen portlandsementin käytön minimoimisessa ja raaka-aineiden kulutuksen vähentämisessä samalla kun betonien tekninen suorituskyky pyrittiin säilyttämään korkeana. URBCON-betoni perustuu alkaliaktivoituihin materiaaleihin, ja siinä käytetään eri teollisuudenalojen jätekiiviaineita sekä rakennus- ja purkujätettä. Kolme pilottihanketta toteutettiin Rotterdamin kaupungissa (Alankomaat), Gentissä (Belgia) ja Westerloissa (Belgia).

### Jalankulkusilta Rotterdamin kaupungissa

Rotterdamin kaupungissa ikääntynyt jalankulkusilta korvattiin sillalla, jossa käytettiin alkaliaktivoitua betonia, joka sisälsi 50 prosenttia kierrätettyjä kiviaineita. Tämä vastasi täydellisesti Rotterdamin kaupungin tavoitetta lisätä materiaalien kierrätystä. Hankkeessa oli haasteita, jotka liittyivät betonin sitoutumiseen ja työstettävyyteen tuotantolaitoksen ja valupaikan välisen etäisyyden vuoksi, minkä lisäksi betonin virumis- ja pakkasenkestävyys huolestutti aluksi. Testauksessa noudatettiin tiukkaa ennalta määriteltyä protokollaa Eurocode 2:n (EN 1992) mukaisesti. Sillan kannan täysimittainen kuormituskoe osoitti vakuuttavasti alkaliaktivoitun betonin lujuuden ja kestävyuden. Vaikka alkaliaktivoitu betoni osoittautui lupaavaksi lyhyellä aikavälillä, sen pitkäaikaiskäyttötymiseen liittyy edelleen



5



6



7

5-7 Westerlon rakennus, yksi perustuksessa käytetyistä lohkoista, päällystekiviä.

8 Gentin portaikko

epävarmuustekijöitä. Tämän vuoksi aloitettiin pitkäaikaisseuranta, jotta sillan turvallinen toiminta voidaan varmistaa sen koko elinkaaren ajan. Seurannan helpottamiseksi Rotterdamin kaupungin insinööriosasto investoi kehittyneeseen kuituoptiseen tekniikkaan rakenteiden kunnon arvioimiseksi.

#### Gentin portaikko

Gentissä paikalliseen kouluun lisättiin paloportaat, joiden betonielementtirakenne valittiin siten, että se sulautuu kouluympäristöön ja

minimoi päivittäisen toiminnan häiriöt. Tarkka muottisuunnittelu ja asennusprosessit olivat avainasemassa korostaen alkaliaktivoitun betonin monipuolisuutta arkkitehtonisissa sovelluksissa. Hankkeeseen liittyi betonitekniisiä erityisvaatimuksia materiaalin lujuuden, ympäristöystävällisyyden, painuman ja työstettävyyden suhteen. Betonielementtien kunnollinen jälkihoito oli kriittinen työvaihe kalkkisuotautumien ja halkeilun estämiseksi. Jälkihoito toteutettiin sisätiloissa valvotuissa olosuhteissa. Asennusprosessi vaati tarkkuutta

elementtien sijoittelussa ja yhdistämisessä, jotta saatiin tarpeeksi vankka portaikkorakenne. Portaikon rakenteellisen kestävyuden varmistamiseksi tehtiin kuormituskoe. Alkaliaktivoitun betonin pitkäaikaiskestävyyden selvittämiseksi toteutetaan laajat testaustoimenpiteet, jotka sisältävät mm. koekuormitustestit ja betonin ominaisuuksien seuranta pitkäällä aikavälillä. Seurantasuunnitelmaan kuuluu esim. useiden olosuhdekoekappaleiden testaaminen. Seuraavien 1, 5, 10 ja 20 vuoden aikana tullaan testaamaan näiden näytteiden





9

puristus- ja vetolujuutta, kimmomoduulia, veden imeytymistä ja karbonatisoitumista. Myös silmämääräisiä tarkastuksia tehdään vuosittain.

### **Kierrätysmateriaalien käyttö rakennuksessa Westerlossa**

Westerlossa alkaliaktivoitun betonin käyttö oli mukana hankkeessa, jonka tavoitteena oli integroida rakentamisen kiertotalouden eri osatekijöitä Kamp C:n käynnistämässä Belgian ensimmäisen (rakennusalan) kiertotaloushankkeen valmisteluissa. Hankkeessa käytettiin alkaliaktivoitussa betonissa Imerysin toimittamia jätevirroista peräisin olevia sekundäärisiä kiviaineita perustuselementteihin, läpäiseviin päällystekiviin ja laattoihin. Laajoissa laboratoriotesteissä tutkittiin betonin puristus- ja vetolujuutta, työstettävyyssominaisuuksia ja kutistumista. Betonimassa modifioitiin vastaamaan perustusten vaatimuksia, erityisesti lujuusluokkaa C20/25, painumaluokkaa S5 ja ympäristökriteerijä EE2, mutta C30/37 EE3 ZVB päällystekivien osalta. Betonin työstöaika oli 60 minuuttia, mikä riitti elementtituotantoon. Perustuselementit asennettiin onnistuneesti Westerlossa.

URBICON-betonin käyttö säästi 22,5 tonnia raaka-aineita ja vähensi hiilidioksidipäästöjä 13 tonnia verrattuna perinteisiin perustuksiin. Perustukset suunniteltiin koottaviksi, puretaviksi ja uudelleenkäytettäviksi, mikä vastaa hankkeen kiertotalouden tavoitteita.

### **Betonikalusteet Gentissä ja Westerlossa**

Gentissä katukalusteet, kuten penkit ja laatat, valmistettiin käyttämällä alkaliaktivoitua betonia ja kierrätettyjä kiviaineita. Westerlossa rakennettiin koottava betonipenkki, jossa käytettiin erilaisia yhteistyökumppanien kanssa kehitettyjä URBICON-betoniseoksia.

### **Loppukommentit**

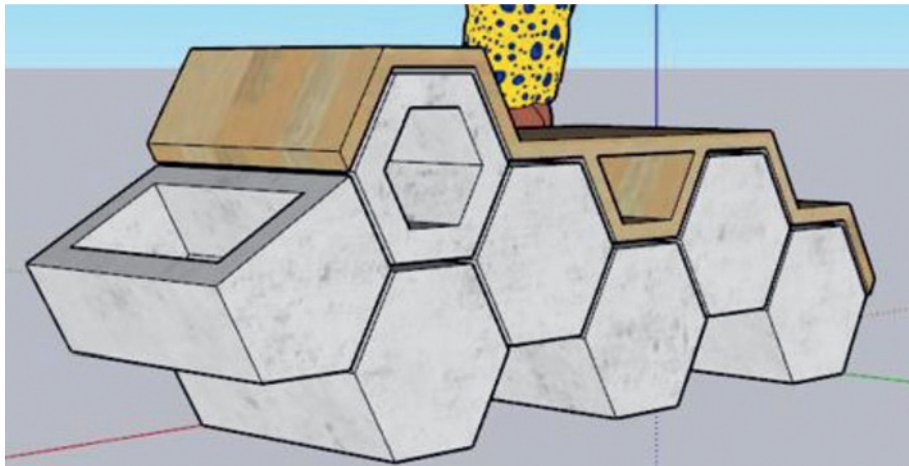
URBICON-hankkeessa tutkitut innovatiiviset alkaliaktivoituidut materiaalit eivät ainoastaan tule muuttamaan rakentamistapojamme, vaan ne tulevat myös määrittelemään rakentamista uudelleen keskittyen kestävytyteen, kierrätykseen ja tulevaisuuteen. Tämä tutkimus osoittaa, että rakentamista voi kehittää hyödyntämällä jättemateriaaleja ja innovatiivisia tekniikoita sekä ylläpitäen samalla sitä toimintakykyä ja pitkäaikaiskestävyyttä, jota voimme odottaa rakennetulta ympäristöltä. Näiden pilotti-

hankkeiden rakentamisella on myös toinen vaikutus, joka edistää ja helpottaa standardointipyrkimyksiä. Kyseessä on jännittävä matka kohti kestävämpää ja resurssija säästävämpää rakentamisen tulevaisuutta, joka tarjoaa mahdollisuuksia kehittää uusia alan standardeja.

Nyt myös VTT:llä on käynnissä alkaliaktivoitujen materiaalien tutkimusta, liittyen esim. keski- ja matala-aktiivisen jätteen immobilisaatioon metakaoliinin avulla. Tämä tutkimus on osa EU-Predis-hanketta ja siinä on saatu tietyillä radioaktiivisilla jätetyypeillä lupaavia tuloksia verrattuna tavanomaisen Portland-sementin käyttöön. VTT tekee myös yhteistyötä Oulun yliopiston kanssa Suomen Akatemian rahoittamassa hankkeessa uusien alkaliaktivoitujen sideaineiden eli EAF-kuonien kehittämisessä, jotka ovat sähköistetynteräksen tuotannon sivuvirtoja. Hankkeessa mm. selvitetään alkaliaktivoitujen materiaalien ja Portland-sementtipohjaisten materiaalien välisiä mekaanisia eroja ja vauriomekanismeja. Tämä hanke osaltaan luo tulevaisuuden raameja alkaliaktivoitujen materiaalien käytölle suomalaisessa rakentamisessa.

9 Katukalusteet Gentissä

10 Koottava betonipenkki Westerlossa, jossa käytettiin kaikkia URBCON-betoniluokkia.



10

### Abstract

The construction industry is shifting towards sustainability, driven by growing environmental concerns and innovative practices. Among the emerging solutions, alternative binders such as alkali-activated materials (AAMs), or geopolymers, have gained significant attention for their low-carbon footprint and customisable properties. This research conducted at the University of Sheffield explores the challenges and opportunities in alkali-activation technology, highlighting the need to explore diverse industrial by-products as alternative precursors. The study, conducted under the Interreg NWE URBCON project, investigates the use of waste materials from various industries as potential precursors for alkali-activated cements. The main findings emerging from this work regard i) the reactivity of calcined waste clays, ii) the potential of basic oxygen furnace (BOF) as a valuable additive in alkali-activation, iii) electric arc furnace (EAF) slag as a stable filler, and iv) the potential of copper slag (CS) as a valuable precursor. This work also explores the incorporation of AAMs in real-world construction projects through the EU Interreg NWE URBCON project. Pilot projects in Rotterdam, Ghent, and

Westerlo demonstrate the viability of alkali-activated concrete in replacing traditional Portland cement. These projects demonstrate the versatility and environmental benefits of AAMs, incorporating waste aggregates and minimising raw material consumption. Specific case studies include the replacement of a pedestrian bridge in Rotterdam, the addition of a fire escape staircase in Ghent, and the integration of alkali-activated concrete in the construction of a circular building in Westerlo. The projects showcase successful applications of alkali-activated materials in diverse structural elements, also contributing to the ongoing effort to establish benchmarks for the broader adoption of AAMs. While the research indicates promising applications, it also highlights the importance of developing standards to ensure the consistent performance and durability of alkali-activated concrete across various projects. Collaborative efforts within the URBCON project and the wider scientific community aim to establish a universally accepted framework for the integration of AAMs in construction.