

Neuraaliverkkomallit auttavat korvaamaan luonnonhiekkaa murskeella

Abhay Bulsari, Nonlinear Solutions Oy,
Turku

Gunnar Lauren, Saint-Gobain Finland Oy,
Weber (Parainen)

Hassan Raad, Saint-Gobain Finland Oy,
Weber (Helsinki)

Luonnonhiekkaa voidaan korvata betonin valmistuksessa jatkossa myös murskeella, sivukivillä ja kierrätyskiviaineksilla.

Tausta

Betoniteollisuus on perinteisesti käyttänyt betonin valmistuksessa luonnonhiekkaa. Vastuullisuussyistä ja viranomaispaineista johtuen luonnonhiekan käyttöä on tulevaisuudessa vähennettävä ja osittain korvattava hiekka murskeella, sivukivillä ja kierrätyskiviaineksilla. Nämä sivuvirtojen partikkelit ovat särmikkäämpiä ja virtaavat huonommin betoneissa ja laasteissa. Ne siis vaikuttavat sekä reologiaan että lujuuteen. Siksi ei ole helppoa määrittää sitä, kuinka paljon sivukiveä voi laittaa betonin valmistuksessa. Jos tietäisimme, kuinka nämä hiekat ja sivukivet vaikuttavat tuoreen ja kovettuneen betonin ominaisuuksiin, voisimme laskea murskeen maksimimäärän niin että ominaisuudet pysyvät sallituissa rajoissa.

Nämä vaikutukset eivät ole yksinkertaisia tai lineaarisia. Siksi perinteiset lineaariset tilastolliset menetelmät eivät tehoa. Sitä vastoin epälineaarinen mallintaminen on tehokas työkalu materiaalien käyttäytymisen kuvaamiseen. Tässä työssä kehitimme pienen koesarjan tuloksista neuraaliverkkomalleja, joiden avulla sivukivien maksimimäärä laastissa (kuva 3) on nyt helppo laskea.

Tekoälyn toinen aalto

Tekoälyn tavoitteena oli matkia ihmisaivoja ja tuottaa kone, joka ajattelee kuin ihminen. Tekoäly oli suosittu 1990-luvun alussa, kun kehitettiin asiantuntijajärjestelmiä, jotka perustuivat sääntöihin ja logiikkaan. Silloin

machine learning tarkoitti sääntöjen löytämistä tiedoista. Neuraaliverkot olivat suosittuja 1990-luvun puolessavälissä, mutta kovin monta sovellusta ei näkynyt betonialalla. Alussa neuraaliverkot olivat osa tekoälyä. Myöhemmin ei puhuttu enää tekoälystä, kun tutkittiin tai sovellettiin neuraaliverkkoja. Valtiokin tuki neuraaliverkkojen tutkimusta avokätisesti, neuraaliverkkoja hypetettiin ja seurauksena oli paljon pettymyksiä. Hypellä on taipumus pudota maan pinnalle. Neuraaliverkot eivät enää olleet suosittuja 2000-luvulla ja 2010-luvun alussa, mutta jotkut kuitenkin jatkoivat niiden käyttöä ja kehitystä, ja sovelsivat myös betonialalla.

Viime vuosina on tullut tekoälyn toinen aalto. Nykyään puhutaan paljon tekoälystä, mutta sovelluksia ei näy useinkaan betoniteollisuudessa. Tekoäly tarkoittaa nyt neuraaliverkkoja, ja robotiikkaa ja konenäkökin leimataan usein tekoälyksi. Oppivia lineaarisiakin malleja kutsutaan joskus tekoälyksi. Toki niitä saa kutsua miksi vain, mutta missä on niiden hyöty betoniteollisuudessa?

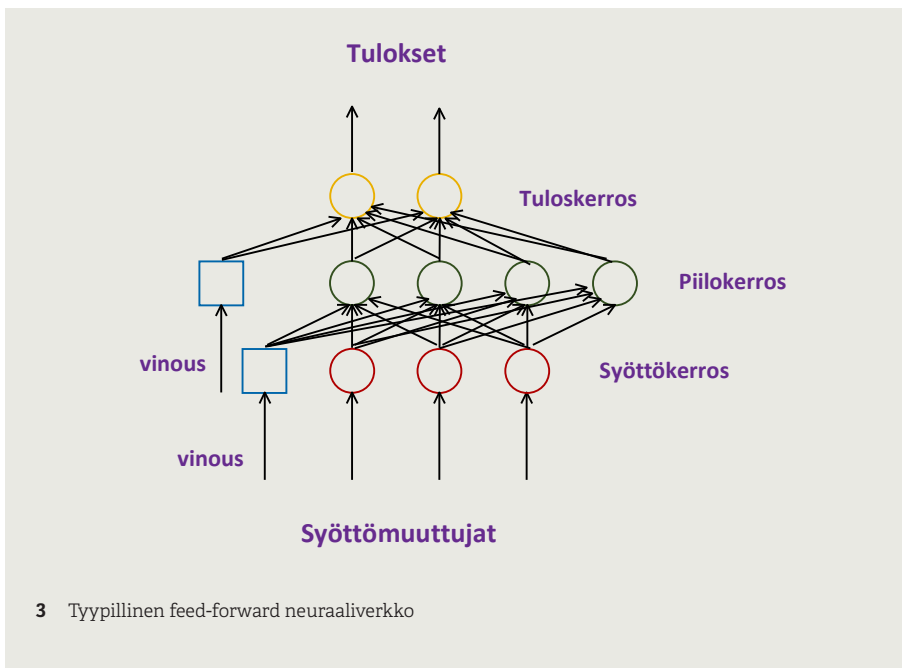
Jotkut ovat kokeneet neuraaliverkkojen tuovan paljonkin hyötyä [1]. Pakkautuvuutta on voitu parannettavan [2], ontelolaatta- ja itse-tiivistyvän betonin reseptit [3, 4] on pystytty optimoimaan kustannustehokkaiksi tai hiili-dioksidipäästöjä vähentäviksi [5], pakkaamisen dynamiikkaa on mallinnettu [6] vaadittavan tiivistysohjeen ymmärtämiseksi, reologiaa on mallinnettu [7], jne.



1 Juotoslaastin yksi kuivabetonituote

2 Kivipohjaiset materiaalit ja tuotteet valmistetaan puhtaista, lähes kotimaisista luonnon raaka-aineista, kuten luonnon hiekasta.





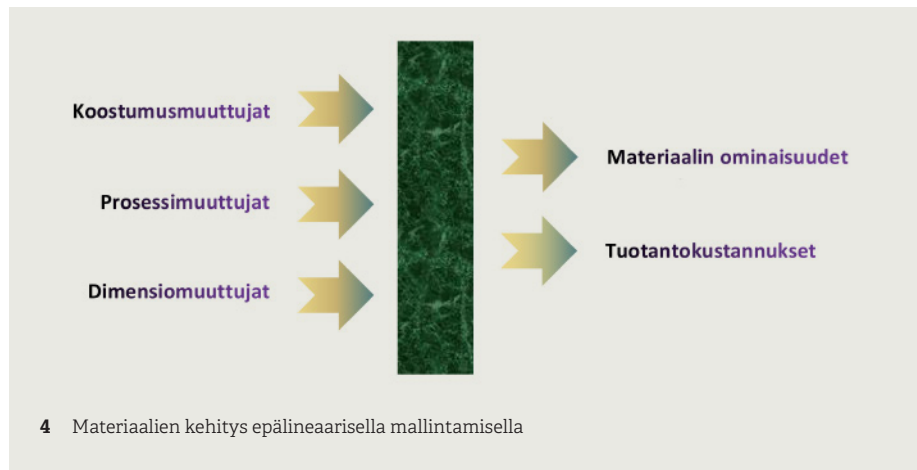
Tässä artikkelissa esiteltävässä tapauksessa kehitettiin ratkaisu, jonka avulla voidaan vähentää luonnonhiekan käyttöä laasteissa.

Epälineaarinen mallintaminen

Epälineaarinen mallintaminen on empiirinen tai semi-empiirinen mallintaminen, jossa otetaan huomioon epälineaarisuuksia. Epälineaarista mallintamista tehdään useilla eri tavoilla. Yksinkertaisinta on käyttää lineaarisessa regressiossa polynomitermejä tai muita epälineaarisuuksia. Epälineaarinen regressiokin on vaihtoehto. Näillä menetelmillä on kuitenkin merkittävänä haittapuolina mm. se, että epälineaarisuuden muoto pitää valita etukäteen. Sen sijaan feed-forward neuraaliverkot perustuvat vapaamuotoisiin epälineaarisuuksiin. Menetelmässä epälineaariset mallit kehitetään tuotantodatasta tai koedatasta. Hyvät epälineaariset mallit pystyvät ekstrapoloimaan jonkin verran, ja se on usein tarpeen, kun kehitetään materiaaleja.

Neuraaliverkot

On useita erilaisia neuraaliverkkoja. Feed-forward neuraaliverkot, erityisesti monikerrokset perseptronit, (kuva 3) ovat hyödyllisimpiä prosessiteknikassa ja materiaalitieteessä. Niiden houkuttelevuus perustuu niiden universaalseen approksimointikykyyn [8]. Se karkeasti tarkoittaa sitä, että ne kykenevät kuvaamaan epälineaarisuuksia, joihin törmäämme teknisessä maailmassa. Niillä on yksi syöttökerros, yleensä yksi tai kaksi piilokerrosta, ja tuloskerros näkyy kuvassa 3.



Syöttökerros sisältää yleensä vain syöttömuuttujat x_i ilman prosessointia. Piilokerroksessa tulevien signaalien painosumma z_i prosessoidaan jollakin epälineaarisella funktiolla, tyypillisesti sigmoidilla $\sigma(a)$.

$$z_i = \sigma \left(\sum_{j=0}^{N_{in}} w_{ij} x_j \right)$$

$$\sigma(a) = \frac{1}{1 + e^{-a}}$$

Tuloskerroksella usein kerätään vain tulevien signaalien painosumma, josta muodostuu mallin tulokset.

$$y_k = v_{0k} + \sum_{i=1}^{N_{hid}} v_{ik} z_i$$

Yllä w_{ij} ja v_{ik} ovat piilokerroksen ja tuloskerroksen painokertoimia. Ensimmäiset termit w_{i0} ja v_{0k} ovat "vinouksia".

Epälineaarinen mallintaminen materiaalien kehityksessä

Neuraaliverkkoja on käytetty prosessiteknikassa yli 25 vuotta [9]. Materiaalien kehityksessä tavoitteena on saavuttaa sellainen ominaisuuksien yhdistelmä, joka pysyy annettujen erilaisten rajoitusten sisällä. Materiaalien ominaisuudet riippuvat koostumusmuuttujista, prosessimuuttujista ja dimensiomuuttujista (kuva 4). Nämä riippuvuudet eivät yleensä ole kovin yksinkertaisia tai lineaarisia. Siksi epälineaarinen mallintaminen on hyvä lähestymistapa kuvaamaan materiaalien ominaisuuksia. Kun mallit eli yhtälöt ovat valmiit, voidaan laskea sopivia arvoja koostumusmuuttujille, prosessimuuttujille ja dimensiomuuttujille, joilla saadaan haluttuja ominaisuuksien yhdistelmiä.

Taloudellisuus on usein pullonkaulana. Siksi pitäisi ottaa huomioon myös tuotantokustannukset. Joskus tavoitteena on vain minimoida raaka-ainekustannuksia niin että ominaisuudet pysyvät halutuissa rajoissa.



5 Kiviaineslouhos

Juotoslaastin epälineaariset mallit

Jotta voidaan laskea luonnonhiekan määrä kuivassa betonissa, pitäisi tietää miten eri tekijät vaikuttavat laastin tärkeisiin ominaisuuksiin. Siksi tässä työssä kehitettiin epälineaariset mallit kuudelle ominaisuudelle: leviämä, ilmapitoisuus, sitomisaika, työestetävyys, 7 päivän lujuus ja 28 päivän lujuus. Saint-Gobain Finland Oy, Weberin Paraisten laboratoriossa tehtiin seulonta- ja sekoituskokeita ja mittauksia. Kokeet suunniteltiin niin että ainakin murskeosuuden vaikutus näkyy selvästi raakadatasta.

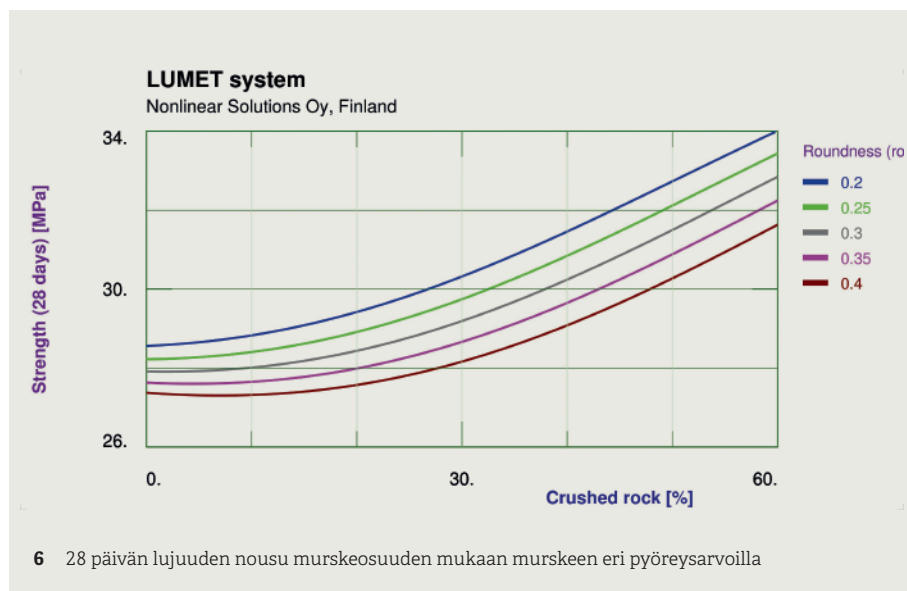
Jos kokeet on suunniteltu hyvin, ei tarvita kovin montaa koetta. Neuraaliverkot eivät tarvitse suuria määriä havaintoja. Suuri osa koesarjoistamme betoniteknikassa on ollut 15–25 kokeiden sarjoja. Jos kokeiden toistettavuus on huono, tai mittauksen tarkkuus on huono, tai jos epälineaarisuudet ovat hyvin monimutkaisia, tai jos on paljon syöttömuuttujia, tarvitaan enemmän kokeita.

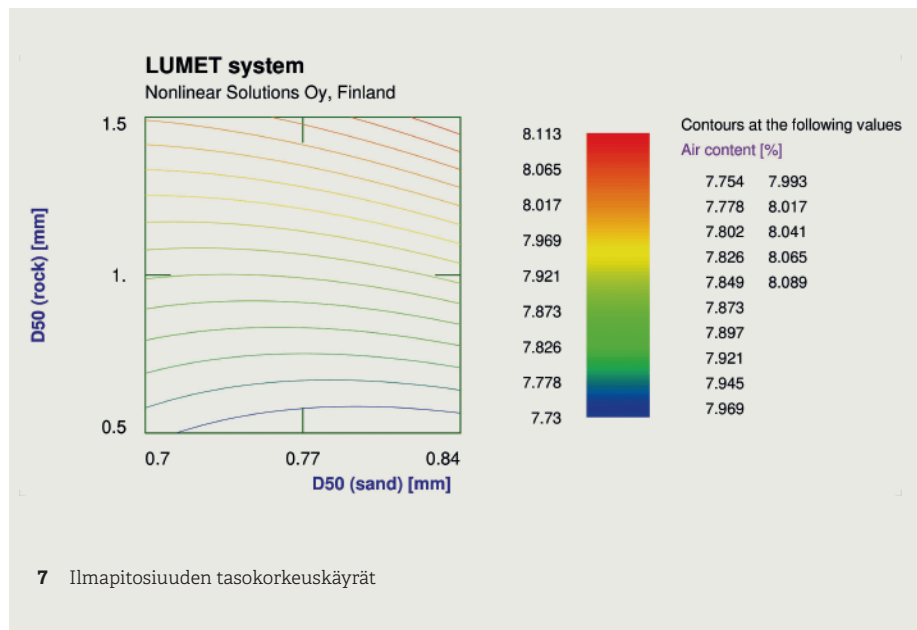
Neuraaliverkkomallit kehitettiin jokaiselle ominaisuudelle erikseen käyttämällä NLS 020 -ohjelmistoa, jota on kehitetty noin 20 vuoden ajan. Ohjelmistolla voi kirjoittaa mallitiedoston, jonka voi lukea toisessa ohjelmistosysteemissä. Lumetti-systeemi on tarkoitettu mallien käyttöä varten. Se on joukko erilaisia ohjelmistokomponentteja, joiden kokoonpano tehdään tarpeen mukaan. Lumetti-systeemissä paitsi lasketaan eli ennustetaan mallien tuloksia, voidaan tehdä paljon muutakin laskentaa ja piirtää erilaisia kuvaajia, esim. kuva 6. Se näyttää,

miten 28 päivän lujuus nousee murskeosuuden mukana, murskeen eri pyöreysarvoilla. Pienet murskeosuudet eivät vaikuta näkyvästi lujuuteen, mutta vaikutus on merkittävä, kun on yli 25% mursketta. Wadellin [10] määritelmän mukaan pyöreys lasketaan seuraavalla yhtälöllä.

$$\text{Roundness} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i \right) / r_{\max}$$

jossa säteet r_i ovat reunojen säteet ja $r_{\max}$ on partikkelin isoimman sisäisen ympyrän säde.





Lineaariset mallit voivat ennustaa jopa negatiivisia arvoja ja siksi on aina järkevä ottaa epälineaarisuuksia huomioon. Kuvassa 7 on esitetty ilmapitoisuus hiekan mediaanihalkaisijan ja murskeen halkaisijan funktiona. Ilmapitoisuus on yleensä isompi, jos partikkelit ovat isompia.

Leviämisen tasokorkeuskäyrät (kuva 8) ovat mielenkiintoisempia. Kuvasta 8 näemme, että murskeen osuudella on vahva vaikutus leviämiseen, mutta murskeen pyöreyskin vaikuttaa merkittävästi, jos murskepitoisuus on korkea. Jos on hyvä pyöreys, voidaan lisätä enemmän mursketta. Eli tällä muuttujaparilla on merkittäviä ristikkäisvaikutuksia. Kuvassa 9 on esitetty sama asia vastepintana.

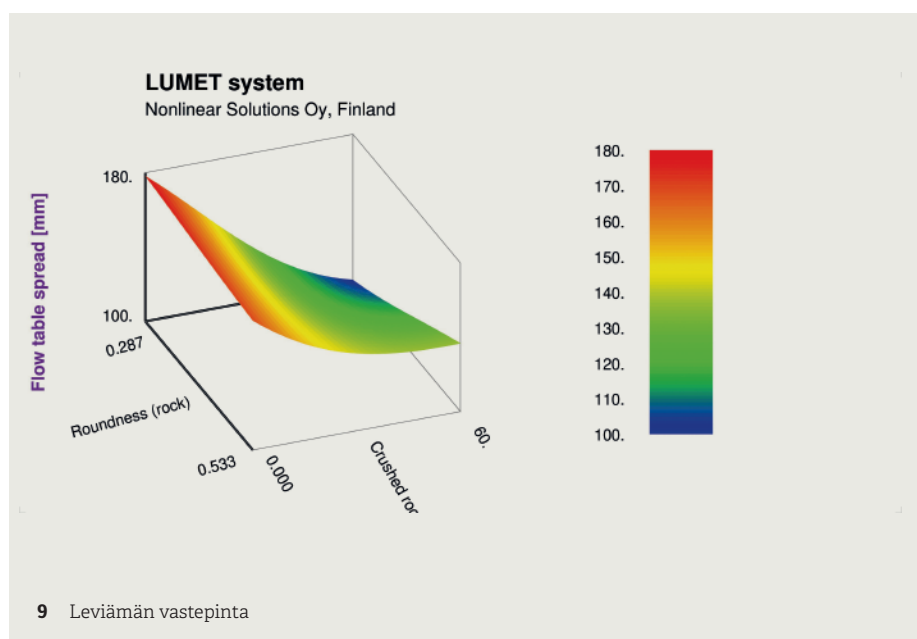
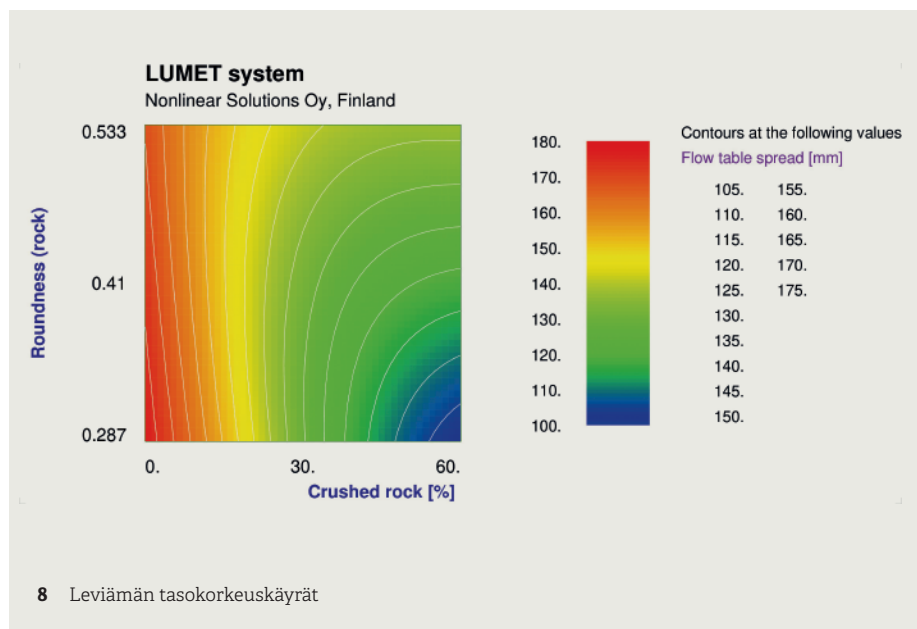
On sanomattakin selvää, etteivät lineaariset menetelmät ole kovin tehokkaita, kun on tällaisia epälineaarisuuksia ja ristikkäisvaikutuksia. Lineaarisen mallin tasokorkeuskäyrät olisivat suoria ja rinnakkaisia.

Yhteenveto

Epälineaarinen mallintaminen, erityisesti neuraaliverkot, on tehokas työkalu materiaalien kehitykseen. Materiaalien ominaisuudet riippuvat koostumus-, prosessi- ja dimensiomuutujista. Nämä riippuvuudet eivät yleensä ole täysin yksinkertaisia tai lineaarisia.

Epälineaarista mallintamista on hyödynnetty jo 30 vuotta teollisuudessa prosessien, materiaalien ja tuotteiden kehityksessä. Betoniteollisuus voi hyötyä paljon epälineaarisesta mallintamisesta.

Voimme melko pienellä vaivalla säästää raaka-ainekustannuksia tai vähentää hiilidioksidipäästöjä. Tämän artikkelin tutkimuksessa on kehitetty ratkaisu, jolla Saint-Gobain Weber voi korvata luonnonhiekkaa sivuvirroilla niin, että tuoteominaisuudet pysyvät halutuissa rajoissa.





10

Viitteet

- [1] http://nonlinear-solutions-oy.com/articles_concrete.php
- [2] Abhay Bulsari, Erik Nordenswan and Aulis Käppi, "Nonlinear models help reduce cement consumption by better packing of aggregates", *Concrete Plant International*, No. 2 (April 2008) 32-36
- [3] Abhay Bulsari, Harri Kylmämetsä and Klaus Juvas, "Nonlinear models of workability and compressive strength help minimise costs", *Concrete Plant International*, No. 6 (December 2009) 36-42
- [4] A. Bulsari, D. Guidon, K. Juvas and O. Skyttä, "SCC: Reducing production costs with nonlinear models/SVB: Senkung der Herstellungskosten mit Nichtlinearen Modellen", *Betonwerk und Fertigteiltechnik (BFT International)*, Vol. 80, No. 6 (June 2014) 36-44
- [5] Abhay Bulsari and Olli Skyttä, "An optimal amount of slag minimises concrete cost and carbon dioxide emissions", *Concrete Plant International*, No. 4 (August 2018) 32-37
- [6] Abhay Bulsari, Klaus Juvas and Olli Skyttä, "Nonlinear dynamics of compaction and packing of three aggregates", *Concrete Plant International*, No. 2 (April 2015) 38-42
- [7] Abhay Bulsari, Harri Kylmämetsä and Klaus Juvas, "Nonlinear models get the rheology of self-compacting concrete right", *Concrete Plant International*, No. 3 (June 2010), 82-87
- [8] K. Hornik, M. Stinchcombe, and H. White, "Multilayer feedforward networks are universal approximators", *Neural Networks*, Vol. 2, (1989) 359-366
- [9] A. Bulsari (ed.), *Neural Networks for Chemical Engineers*, Elsevier, Amsterdam, 1995
- [10] H. Wadell, "Volume, shape, and roundness of rock particles", *The Journal of Geology*, Vol. 40 (1932) 443-451

Neural network models help replace natural sand with crushed rock

Concrete industry has used natural sand for a long time. It is now becoming important to reduce the use of natural sand for sustainability reasons as well as because of pressure from authorities.

Crushed rock and recycled aggregate, however, are usually not as round as natural sand and therefore cannot be added in large amounts without losing workability and rheological properties. Addition of crushed rock also affects the strength of concrete. To have a more complete picture of the situation, it is necessary to understand the effects of adding crushed rock with different roundnesses and particle size distributions on the properties of fresh as well as hardened concrete.

These effects, however, are not simple nor linear. Therefore, conventional linear statistical techniques are not very effective. Nonlinear modelling using neural networks are efficient at describing nonlinearities from limited amounts of data with the right tools and skills. Over 30 years, they have been found to be very powerful methods for speeding up materials development including concretes, and for making production processes more efficient. A small amount of effort and a small investment often lead to large savings or improvements in productivity or quality. These days, this is also labelled artificial intelligence and machine learning.

In this work, neural network models for a few properties of concrete were developed from a small experimental series and implemented

in a software system. With this kind of quantitative knowledge, we can now quickly calculate the maximum amount of crushed rock or recycled aggregate which can be added without adversely affecting the properties of concrete.

10 Sora - hiekka seulojen jaottelu.