



Ville Alakärppä

Veden pH-mittauksen ja ohjeistuksen kehittäminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

19.5.2025

Tiivistelmä

Tekijä: Ville Alakärppä
Otsikko: Veden pH-mittauksen ja ohjeistuksen kehittäminen
Sivumäärä: 34 sivua + 2 liitettä
Aika: 19.5.2025

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Energia- ja ympäristötekniikka
Ammatillinen pääaine: Ympäristötekniikka
Ohjaajat: Lehtori Miika Kuivikko
Tuotepäällikkö Arto Asmundi

Opinnäytetyössä kehitettiin Rudus Oy:n kierrätysyksikön laadunvalvontaa, erityisesti betonijätteen käsittelyyn liittyvää veden pH-arvon seurantaa ja säätelyä. Betonin kierrätys on keskeinen osa rakennusalan kestävästä kehityksestä ja kiertotaloutta, mutta betonin epäpuhtausominaisuudet voivat aiheuttaa haittaa maaperälle ja vesistöille. Työssä tarkasteltiin betonin ympäristövaikutuksia, sen tuotantoprosessia, ympäristölupaprosessia sekä Ruduksen valmistamaa Betoroc-kierrätysmurskettä.

Työn painopisteenä oli pH-mittauksen käytännön toteutus, kenttäolosuhteisiin soveltuvat mittalaitteet sekä automaatiojärjestelmän rooli veden neutraloinnissa. Työssä käytiin läpi näytteenoton ja kalibroinnin vaiheet sekä järjestelmän tekninen toteutus, joka perustuu hiilidioksidin syöttöön.

Opinnäytetyössä havaittiin tarvetta kehittää mittausprosessia, parantaa kalibroitimi-
tiineja ja lisätä henkilöstön osaamista ohjeistusten avulla. Tuloksena laadittiin käytännönläheiset ohjeet pH-mittaukseen ja automaatiojärjestelmän käyttöön.

Avainsanat: pH-mittaus, neutralointi, betoni, betonijäte, karbonatisoituminen

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla. Opinnäytetyöraportin kieliasun muotoilussa ja tarkistamisessa on käytetty OpenAI:n ChatGPT:n versiota 4. Opinnäytetyön tekijä on vastuussa kaikesta opinnäytetyön sisällöstä ja muotoilusta.

Abstract

Author: Ville Alakärppä
Title: Enhancing Water pH Measurement Practices and Instructional Materials
Number of Pages: 34 pages + 2 appendices
Date: 19 May 2025

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Energy and Environmental Technology
Professional Major: Environmental Technology
Supervisors: Miika Kuivikko, Senior Lecturer
Arto Asmundi, Product Manager

The thesis focused on improving quality control of Rudus Oy's recycling unit, particularly the monitoring and regulation of water pH levels during concrete waste processing. Concrete recycling plays a key role in promoting sustainability and circular economy within the construction industry. However, concrete's alkaline nature can pose risks to soil and water systems. The thesis examined the environmental impacts of concrete, the production process, the environmental permitting process, and Rudus's recycled concrete product Betoroc.

The focus was placed on the practical implementation of pH measurement, the use of field measurement devices, and the role of an automation system in water neutralization. In addition, the steps involved in pH monitoring and calibration, as well as the technical setup of the system, which is based on carbon dioxide injection, were described in detail.

The findings revealed a requirement to enhance the measurement process, improve calibration routines, and strengthen staff knowledge through clear instructions. As a result, practical instructions were created for both pH measurement and the operation of the automation system.

Keywords: pH measurement, neutralization, concrete, concrete waste, carbonation

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Yritysesittely	2
2.1	Yrityksen tausta ja liiketoiminta	2
2.2	Yrityksen kierrätystoiminta	3
3	Betonin ympäristövaikutukset	3
3.1	Betonin ympäristöpäästöt	3
3.2	Betonin ja sementin valmistus	5
3.3	Betoni hiilinieluna	8
4	Betonin kierrätys ja siihen liittyvä sääntely	10
4.1	Betonijätteen luonne ja käsittely	10
4.2	Betonijätteen kiertotalous	11
4.3	Betoroc	14
4.4	Ympäristölupakäytännöt kierrätysalueella	14
5	Veden laadunvalvonta ja pH-mittaus	17
5.1	Taustaa	17
5.2	pH-mittauksen perusteet	17
5.3	pH-mittauksen työvaiheet	19
5.4	Automaatiojärjestelmän rooli ja sen käyttö	21
6	Kehitystoimenpiteet ja johtopäätökset	25
6.1	Automaatiojärjestelmän käytön ja pH-mittaamisen kehittäminen	25
6.2	Henkilöstön ohjeistus	26
7	Yhteenveto	29
	Lähteet	30

Liite 1: pH-mittarin kalibrointiohje

Liite 2: Emäksisyyden neutralisointi

Lyhenteet

CE-merkintä:	Merkintä, jolla tuotteen valmistaja tai valtuutettu edustaja vakuuttaa, että tuote täyttää sitä koskevat EU:n direktiivien ja asetusten vaatimukset.
EEJ-asetus:	Valtioneuvoston asetus betonimurskeen jätteeksi luokittelun päättymisen arviointiperusteista.
ELY-keskus:	Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus.
MARA-asetus:	Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maanrakentamisessa.

1 Johdanto

Kestävän kehityksen periaatteet ovat nousseet keskiöön rakennusalan toiminnassa, kun toiminnassa pyritään vähentämään luonnonvarojen käyttöä ja pienentämään ympäristövaikutuksia. Rakennusteollisuus on yksi suurimmista jätteen tuottajista, ja erityisesti betonijäte muodostaa suuren osan syntyvästä rakennus- ja purkujätteestä. Tämän vuoksi betonin uudelleenkäyttö ja siihen liittyvä laadunvalvonta ovat keskeisiä tekijöitä rakennusalan ympäristötavoitteiden saavuttamisessa.

Tässä opinnäytetyössä keskitytään Rudus Oy:n kierrätysyksikön laadunvalvonnan kehittämiseen erityisesti betonijätteen pH-arvojen hallinnan näkökulmasta. Rudus Oy on suomalainen rakennusmateriaaleja valmistava yritys, jonka toimialoihin kuuluvat muun muassa valmisbetonin tuotanto, kiviaineksen murskaus ja myynti. Tämän lisäksi toimintaan kuuluu myös betonin kierrättäminen ja kierrätysyksikkö vastaanottaakin vuosittain suuria määriä betoni- ja tiilijätettä, jotka jalostetaan uudelleen käyttökelpoisiksi rakennusmateriaaleiksi, kuten Betoroc-murskeeksi.

Betonin emäksisyys aiheuttaa erityisiä haasteita, sillä siitä liukenevat yhdisteet voivat vaikuttaa haitallisesti maaperään ja vesistöihin. Tästä syystä pH:n jatkuva seuranta ja hallinta on tärkeä osa ympäristövastuullista toimintaa. Työssä tarkastellaan pH-mittauksen perusteita, kenttäolosuhteisiin soveltuvia mittalaitteita ja käytössä olevan automaatiojärjestelmän roolia valuma-aldaiden veden laadun säätelyssä.

Opinnäytetyön tavoitteena on tuottaa konkreettisia kehitystoimenpiteitä, joiden avulla pH-mittauksen tarkkuutta, toistettavuutta ja dokumentointia voidaan parantaa. Samalla pyritään yhtenäistämään henkilöstön käytäntöjä ohjeistuksilla. Kehitetty ohjeistus tukee yritystä ympäristötavoitteissaan ja auttaa täyttämään viranomaisvaatimukset tehokkaammin ja systemaattisemmin.

2 Yritysesittely

2.1 Yrityksen tausta ja liiketoiminta

Rudus Oy on suomalainen rakennusmateriaaleja valmistava yritys, jonka juuret ulottuvat yli sadan vuoden taakse. Yrityksen historia alkaa vuodesta 1897, jolloin perustettiin Lohjan Kalkkitehdas Osakeyhtiö. Alkuvaiheessa toiminta keskityi kalkkikiven louhintaan ja jalostamiseen, mutta vuosikymmenten mittaan liiketoiminta on laajentunut ja kehittynyt. [1.]

Yritys laajensi toimintaansa kiviainestuotantoon vuonna 1939 ostamalla Oy Rudus Ab:n osake-enemmistön. Kiviainestuotanto on edelleen yrityksen keskeisiä liiketoiminta-alueita. Valmisbetonin tuotannon Rudus aloitti ensimmäisenä Suomessa vuonna 1958, ja 1960-luvulla sen tuotevalikoima laajeni betonituotteisiin. [1.]

Vuosien saatossa Ruduksesta on kasvanut monialainen toimija, jonka toiminta kattaa betonin, betonituotteiden, kiviainesten ja kierrätysmateriaalien valmistuksen ja myynnin. Vuonna 2023 yrityksen liikevaihto oli 266 miljoonaa vuonna 2023, työllistäen 840 henkilöä [2, s. 3].

Rudus Oy toimii osana kansainvälistä CRH-konsernia, johon se on kuulunut vuodesta 1999. CRH on irlantilainen pörssinoteerattu yritys, joka on yksi maailman suurimmista rakennusmateriaalialan yrityksistä. Konserni toimii yli 29 maassa ja sen palveluksessa oli vuonna 2024 noin 79 800 henkilöä. CRH:n liikevaihto oli samana vuonna noin 35,6 miljardia euroa. [3.]

2.2 Yrityksen kierrätystoiminta

Rudus Oy on toiminut kierrätyksen ja kiertotalouden parissa jo vuosikymmeniä. Yrityksen kierrätysyksikkö toimii osana laajempaa vastuullisuusstrategiaa, jonka tavoitteena on vähentää rakentamisesta aiheutuvaa ympäristökuormitusta sekä säästää neitseellisiä luonnonvaroja. Kierrätysyksikön keskeisimpiä tehtäviä ovat ylijäämämaiden sekä betoni- ja tiilijätteen vastaanotto, käsittely ja jalostaminen uusiokäyttöön. Vuotuisesti yksikön kautta kierrätetään noin 500 000 tonnia betonia, tiiltä ja lentotuhkaa. [4.]

Vastaanotettavasta betonijätteestä valmistetaan Betoroc-mursketta, joka on CE-merkittyä betonimursketta, jota voidaan hyödyntää laajalti erilaisissa rakennuskohteissa. Mursketta valmistetaan MARA- ja EEJ-asetusten mukaisesti korvaamaan perinteisiä kalliomurskeesta valmistettuja materiaaleja. Asetuksilla on edistetty betonijätteiden hyötykäyttöä rakentamisessa tietyin reunaehdoin. MARA-asetus eli ”Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maanrakentamisessa” mahdollisti betonijätteen käytön maanrakentamisessa, kun taas EEJ-asetus ”Valtioneuvoston asetus betonimurskeen jätteeksi luokittelun päättymisen arviointiperusteista” mahdollisti laajemman käytön ilman jätesatusta. [4.]

3 Betonin ympäristövaikutukset

3.1 Betonin ympäristöpäästöt

Rakennusala on yksi merkittävimmistä tekijöistä ilmastonmuutoksen hillinnässä sekä luonnonvarojen kestäväen käytön edistämisessä. Alan rooli korostuu erityisesti raaka-aineiden käytön ja jätteentuotannon näkökulmasta. Globaalisti noin 50 % kaikista raaka-aineista ohjautuu rakentamisen tarpeisiin. Euroopan unionin alueella noin kolmannes kokonaisjätteen määrästä muodostuu rakennus- ja purkutoiminnasta. Suomessa rakennusalan osuus jätteentuotannosta on tätäkin suurempi, sillä jopa puolet kaikesta syntyvästä jätteestä on peräisin rakentamisesta ja purkamisesta. [5.]

Betoni on maailman käytetyin rakennusmateriaali, ja sen käyttö on keskeistä erityisesti infrastruktuurirakentamisessa, kuten silloissa ja rakennusten perustuksissa. Laajan käytön taustalla on materiaalin hyvä saatavuus, mekaaninen kestävyys ja muunneltavuus. Betonin valmistusprosessi aiheuttaa kuitenkin merkittäviä ympäristövaikutuksia, joista keskeisin on hiilidioksidipäästöjen synty sementin tuotannon yhteydessä.

Globaalilla tasolla sementti- ja betoniteollisuus vastaa noin 8 % kaikista ihmisen aiheuttamista hiilidioksidipäästöistä [6, s. 1]. Suomessa tilanne on verrattain parempi, sillä kotimaisen betoniteollisuuden osuus päästöistä on alle 2 %. Tämä johtuu muun muassa energiatehokkuuden parantamisesta, kierrätyspolttoaineiden käytöstä sekä kehittyvistä hiilidioksidin talteenotto- ja hyödyntämisteknologioista. [7.]

Hiilidioksidipäästöjen lisäksi betonin ympäristövaikutuksia arvioitaessa on huomioitava sen vaikutukset paikalliseen maaperään ja vesistöihin, erityisesti silloin kun betoni päätyy jätteeksi rakennusten purkamisen jälkeen. Betonijäte on emäksistä, ja sen varastointi tai läjitys voi johtaa emäksisten yhdisteiden liukemiseen ympäristöön. Tällaisia yhdisteitä ovat muun muassa kalsium, natrium ja kalium, jotka voivat muuttaa ympäröivän maaperän pH-tasapainoa. Tämä puolestaan voi vaikuttaa negatiivisesti maaperän mikrobiologiseen aktiivisuuteen, kasvien kasvuolosuhteisiin sekä pohja- ja pintavesien laatuun. Kasvit kasvavat luonnostaan parhaiten lievästi happamassa ympäristössä [8].

Rakennusalan kestävyuden kehittäminen edellyttääkin paitsi vähäpäästöisten sementti- ja betonivalmisteiden hyödyntämistä, myös tehokkaita kierrätysratkaisuja ja laadunvalvontaa, joilla varmistetaan, ettei betonijäte aiheuta ympäristölle haittaa. Veden pH-arvon valvonta betonijätteen käsittelyalueilla on yksi konkreettinen toimi, jolla voidaan varmistaa, että toiminnan positiiviset ympäristövaikutukset eivät mene hukkaan.

3.2 Betonin ja sementin valmistus

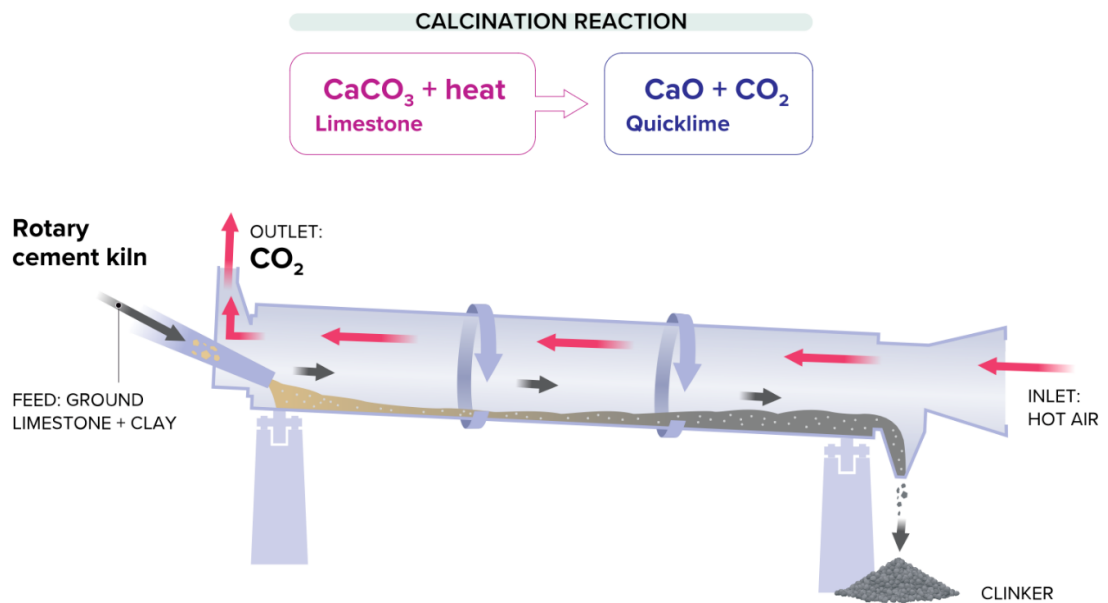
Betoni on materiaali, joka koostuu kiviaineksesta ja sideaineena toimivasta sementistä. Näiden lisäksi betonin valmistuksessa käytetään vettä ja usein myös erilaisia lisä- ja seosaineita, joilla säädellään betonin ominaisuuksia, kuten työstettävyyttä ja lujuudenkehitystä. Betonin sitoutuminen ja kovettuminen perustuvat sementin ja veden välisiin kemiallisiin reaktioihin, erityisesti hydratoitumiseen.

Yleisimmin käytetty sementtilaatu on portlandsementti, joka on energiantensiivinen valmistaa. Sementti on veden jälkeen maailman toiseksi käytetyin materiaali, ja sen vuotuinen tuotantomäärä maailmassa ylittää neljä miljardia tonnia [9].

Sementin valmistuksen tärkein raaka-aine on kalkkikivi, joka on yleinen kivilaji maailmanlaajuisesti. Suomessa kalkkikiveä on kuitenkin vähän. Kaikkiaan sitä on vain 0,15 %:n osuus Suomen kallioperästä. Kalkkikivi on ominaisuuksiltaan huokoinen ja emäksinen sedimenttikivi. [10, s. 190.]

Sementin tuotantoprosessi käynnistyy kalkkikiven louhinnalla, murskaamisella ja jauhamisella, minkä jälkeen se johdetaan pyörivään klinkkeriuuniin. Prosessin keskeinen vaihe on klinkkeröinti, joka tapahtuu pitkässä kiertouunissa (kuva 1). Klinkkeröinnissä kalkkikivi (CaCO_3) ja muut tarvittavat lisäaineet kalsinoituvat, eli muuttuvat kuumuudessa kalsiumyhdisteiksi, kuten kalsiumoksidiksi (CaO), vapauttaen samalla hiilidioksidia (CO_2). Klinkkeröintivaihe voi tuottaa jopa 70 % sementin päästöistä [11]. Sementtiklinkkeritonin valmistamiseen tarvitaan noin 1,5 tonnia kalkkikiveä, jolloin prosessissa vapautuu ilmaan noin 500 kg hiilidioksidia [12].

Cement production (and source of CO₂)



Kuva 1. Kalkkikiven klinkkeröinti yksinkertaistettuna [13].

Klinkkeröinnin aikana jauhe kuumennetaan korkeaan, noin 1 450 °C:n lämpötilaan, jolloin se sulaa ja muodostaa laavamaisen massan. Kiertouunin loppupäässä massa jäähdytetään nopeasti, jolloin siitä tulee karkea soraomainen komponentti. Sora jauhetaan seosaineiden ja kipsin kanssa hienoksi jauheeksi, minkä jälkeen lopputuotteena syntyy sementtiä. [13.]

Taulukko 1. Sementin (CEM I) tyypillinen kemiallinen koostumus [14].

Komponentit	Massaosuus (%)
	Tyyppi I/II (CEM I)
Piiksidit (SiO ₂)	20,1
Alumiinioksidit (Al ₂ O ₃)	4,7
Rautaoksidit (Fe ₂ O ₃)	3,5
Kalsiumoksidit (CaO)	63,7
Magnesiumoksidit (MgO)	0,7
Rikkioksidit (SO ₃)	3,1
Hehkutushäviö	2,6
Liukenematon jäännös	0,3

Portlandsementin valmistusprosessissa voidaan hyödyntää erilaisia seosaineita, joiden avulla ympäristölle aiheutuvaa haittaa saadaan pienennettyä. Seosaineina voidaan käyttää esimerkiksi teollisuuden sivutuotteita, kuten masuunikuonaa tai lentotuhkaa, joilla on sopivat hydrauliset ominaisuudet. Seosainemääriä ei voida kasvattaa liiallisesti, sillä liian suuri määrä voi heikentää sementin ominaisuuksia, kuten sen lujuudenkehityksen nopeutta. [15.]

Seosaineena käytettävä lentotuhka syntyy kivihillen polton yhteydessä voimalaitoksissa. Lentotuhkan saatavuus heikentyy kivihillen käytön vähentyessä ilmastotavoitteiden myötä. Suomessa tilanne konkretisoitui 1.4.2025, kun Helsingin viimeinen kivihilltä käyttänyt kivihilivoimalaitos, Salmisaaren voimalaitos suljettiin. Lisäksi Suomen lainsäädäntö kieltää kivihillen käytön energiantuotannossa kokonaan 1.5.2029 alkaen. [16.] Masuunikuona on raudan valmistuksen sivutuote. Raudan valmistuksessa ollaan siirtymässä masuuneista valokaariuuneihin, mikä voi myös heikentää masuunikuonan saatavuutta. [17.]

3.3 Betoni hiilinieluna

Vaikka betonin valmistus aiheuttaa merkittäviä hiilidioksidipäästöjä, sillä on myös kyky sitoa ilmasta hiilidioksidia elinkaarensa aikana niin sanotun karbonatisoitumisprosessin kautta. Karbonatisoituminen on kemiallinen reaktio, jossa betonin kalsiumhydroksidi ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) reagoi ilman hiilidioksidin (CO_2) kanssa muodostaen kalsiumkarbonaattia (CaCO_3). Reaktion myötä betonin emäksisyys laskee merkittävästi. Prosessi käynnistyy heti valmistusvaiheen jälkeen ja etenee betonin pintakerroksista syvemmälle rakenteeseen ajan kuluessa. [18.]

Prosessi palauttaa osan sementin valmistuksessa vapautuneesta hiilidioksidista betoniin. Koko suunnitellun käyttöiän aikana hiilidioksidia sitoutuu takaisin noin 5–10 % valmistuksesta muodostuneista päästöistä. Reaktion nopeuteen vaikuttavat useat tekijät, kuten betonin tiiveys ja vesisementtisuhte. Tiiviimpi betoni hidastaa hiilidioksidin etenemistä, kun taas huokoinen rakenne mahdollistaa nopeamman prosessin. [18.]

Karbonatisoituminen voi vaikuttaa betoniin sekä positiivisesti että negatiivisesti riippuen betonin käyttötarkoituksesta. Raudoittamattomissa betonirakenteissa tämä ilmiö voi olla hyödyksi, sillä kalsiumkarbonaatin muodostuminen pintakerrokseen tiivistää betonin huokosia ja parantaa sen lujuutta ja kestävyyttä.

Usein betonia käytetään yhdessä raudoituksen kanssa, jolloin karbonatisoituminen voi aiheuttaa merkittäviä ongelmia. Kun reaktio saavuttaa raudoituksen, betonin tuoma emäksinen korroosiosuoja loppuu ja teräsraudoitus alkaa ruostua. Ruostuminen taas johtaa raudoituksen tilavuuden laajenemiseen, mikä aiheuttaa betonin halkeilua ja lujuuden heikentymistä. Karbonatisoitumissyvyyden seuranta onkin tärkeää erityisesti kantavissa betonirakenteissa. [18.]

Karbonatisoitumista voidaan hyödyntää tietoisesti hiilidioksidin talteenottoon erityisesti betonin elinkaaren loppuvaiheessa. Kun vanhoja betonirakenteita puretaan, niiden murskaaminen paljastaa reagoimattomia pintoja. Näin saadaan lisättyä betonin pinta-alaa, johon hiilidioksidi voi sitoutua. Murskattu betoni, kuten Ruduksen valmistama Betoroc-murske, voi näin toimia paitsi rakennusmateriaalina, myös pitkäaikaisena hiilivarastona. [18;19.]

Kemiallisesti tarkasteltuna hiilidioksidin sitoutuminen betoniin on riippuvainen klinkkerin sisältämän kalsiumoksidin (CaO) määrästä. Stoikiometrisesti reaktion komponenttien suhde on 1:1, mikä tarkoittaa, että yksi mooli hiilidioksidia sitoutuu yhteen mooliin kalsiumoksidia. Reaktio voidaan esittää kaavan 1 mukaisesti:



Reaktioyhtälön avulla voidaan arvioida betonin teoreettista kykyä sitoa hiilidioksidia elinkaarensa aikana. Sementin kalsiumoksidin massapitoisuus on tyypillisesti n. 64 %. Taulukon 1 mukaisessa sementissä kalsiumoksidin massapitoisuus on 63,7 %. Sementti koostuu pääasiassa klinkkeristä, jonka osuus on CEM I sementissä 95–100 % riippuen lisätyn kipsin määrästä. Seosaineita sisältävissä sementeissä klinkkerin määrä on pienempi. Mikäli klinkkeripitoisuudeksi oletetaan 95 %, se tarkoittaa, että tonnissa sementtiä on n. 60,5 % kalsiumoksidia. Hiilidioksidin teoreettisen sitoutumiskapasiteetin sementtiin voi laskea moolimassojen avulla seuraavasti:

$$CO_2 = 605 \text{ kg} \times \frac{M_{CO_2}}{M_{CaO}} = 605 \text{ kg} \times \frac{44}{56} = 475 \text{ kg} \quad (2)$$

4 Betonin kierrätys ja siihen liittyvä sääntely

4.1 Betonijätteen luonne ja käsittely

Betonijätettä syntyy rakennus- ja purkutoiminnan eri vaiheissa ja sitä muodostuu vuosittain noin 2,5 miljoonaa tonnia. Merkittävimmät betonijätteen lähteet ovat rakennusten purkutytöt, rakennusprosessien ylijäämämateriaalit sekä betonin valmistuksen sivutuotteet, kuten betoniliete. Lisäksi työmailla syntyy ylijäämäbetonia, jota ei pystytä hyödyntämään kohteeseen. [20.]

Suomessa betonin käyttö yleistyi nopeasti erityisesti 1960–70-luvuilla, jolloin kaupungistuminen ja lähiöiden rakentaminen loivat tarpeen nopeille ja edullisille asuinratkaisuille. Tarpeeseen vastattiin betonielementtirakentamisella, joka mahdollisti asuntojen nopean sarjatuotannon. Rakennettujen elementtitalojen suunnittelussa ja rakentamisessa painotettiin nopeutta ja kustannustehokkuutta. Nyt aikakauden rakennuskanta on peruskorjauksiässä ja osittain jopa purkukunnossa. [21.]

A-Insinöörien laatiman selvityksen mukaan vanhojen rakennusten purkaminen ja uusien rakentaminen voi monissa tapauksissa olla taloudellisesti ja ympäristön kannalta perusteltua. Erityisesti silloin, kun vanha rakennus ei vastaa nykyisiä energiatehokkuus- ja turvallisuusvaatimuksia. Tämä synnyttää kuitenkin huomattavia määriä rakennusjätettä, joista betonijäte muodostaa merkittävän osan. [22.]

Rudus Oy vastaanottaa betonijätettä toimipisteillään oheisen luokittelun mukaisesti. Jätteet erotellaan kappalekoon, rakenteen ja sisällön perusteella seuraavasti:

- betonijäte pulveroitu, sivumitta alle 0,5 metriä
- betonijäte, sivumitta alle 1 metriä
- betonijäte, sivumitta 1–5 metriä
- betonijäte, erikoiskappaleet
- betonijäte, sisältää tiiltä
- ylijäämäbetoni
- kevyet betonit
- tiilijäte
- betonikiviaines

4.2 Betonijätteen kiertotalous

Betonijätteen uudelleenkäyttöä on pyritty edistämään lainsäädännöllisin keinoin, jotka tukevat kiertotalouden toteutumista rakentamisessa. Vuonna 2022 voimaan tullut ns. Ei Enää Jätettä -asetus mahdollistaa betonijätteestä valmistetun betonimurskeen käytön laajemmin kuin pelkästään perinteisessä maanrakentamisessa. [23.]

Asetuksen mukaista betonimursketta voidaan käyttää maa-, viher- ja talonrakentamisen lisäksi uuden betonin ja betonituotteiden valmistukseen. Käyttämättömästä betonista tehtyä mursketta voidaan lisäksi hyödyntää lannoitteena, kalitusaineena, maanparannusaineena tai kasvualustana. [23.]

Asetuksessa määritellään muun muassa haitta-aineiden pitoisuuksien enimmäisarvot (kuva 3), betonimurskeen muut kelpoisuusvaatimukset (kuva 4) sekä valmistajan velvollisuuden käyttää riippumattoman osapuolen vahvistamaa laadunvalvontajärjestelmää. Tavoitteena on varmistaa materiaalin turvallinen käyttö ja suojella ympäristöä, kuten pohja- ja pintavesiä. Rudus Oy:n kohdalla laadunvalvonnasta ja sertifiointista vastaa Inspecta Sertifiointi Oy, joka auditoi ja todentaa betonimurskeen tuotannon ja laadun säännöllisesti. [23.]

Taulukko 2. EEJ-asetukseen määritetyt suurimmat sallitut liukoisuudet ja pitoisuudet [23].

Haitta-aine	Liukoisuus mg/kg (L/S 10)	Kokonaispitoisuus (mg/kg)
Antimoni (Sb)	0,2	
Arseeni (As)	0,1	
Barium (Ba)	5	
Kadmium (Cd)	0,02	
Kromi (Cr)	0,6	
Kupari (Cu)	1	
Elohopea (Hg)	0,01	
Molybdeeni (Mo)	0,7	
Nikkeli (Ni)	0,3	
Lyijy (Pb)	0,1	
Seleeni (Se)	0,2	
Vanadiini (V)	0,3	
Sinkki (Zn)	4	
Fluoridi (F ⁻)	12	
Kloridi (Cl ⁻)	200	
Sulfaatti (SO ₄ ²⁻)	300	
PAH-yhdisteet		30
PCB-yhdisteet		1
Öljyhiilivedyt ≥ C10-C40		200

Taulukko 3. Epäpuhtauksien sallitut enimmäismäärät EEJ-murskeessa [23].

Materiaalien ja epäpuhtauksien tyypit	Määrä
Tiilien ja tiililaattojen, kalkkihiekkatiilien ja -harkkojen sekä muiden poltettujen tiilien sekä kellumattoman vaahtobetonin yhteenlaskettu määrä	10 paino-%
Saven ja muun koheesiomaan ja maa-aineksen, sekalaisten metallien (metallit ja rautayhdisteitä sisältämättömät metallit), kellumattoman puun, muovin ja kumin sekä kipsilaastin yhteenlaskettu määrä	1 paino-%
Saven ja muun koheesiomaan ja maa-aineksen, sekalaisten metallien (metallit ja rautayhdisteitä sisältämättömät metallit), kellumattoman puun, muovin ja kumin, kipsilaastin sekä lasin yhteenlaskettu määrä	1 paino-%
Kelluvat epäpuhtaudet	5 cm ³ /kg

Betonimurskeen käytön merkittävimmät erot luonnonkivimateriaaleihin verrattuna liittyvät pohjavesien ja vesistöjen läheisyydessä työskentelyyn. EEJ-asetuksen mukaan betonimurskeen käyttö on rajoitettua alueilla, joilla on riski veden pilaantumiselle. Betonimursketta ei saa käyttää pohjaveden pinnan alapuolella, koska muun muassa emäksiset yhdisteet voivat liueta ympäristöön ja aiheuttaa kemiallisia muutoksia veden laatuun. Jos mursketta käytetään vedenhankintaan tärkeällä pohjavesialueella, murskekerroksen ja pohjaveden pinnan välin on oltava pysyvästi vähintään kaksi metriä. [23.]

Aiemmin betonijätteen hyödyntäminen perustui pääasiassa MARA-asetukseen, joka sallii jätteiden käytön tietyissä maanrakennuskohteissa ilman erillistä ympäristölupaa, kunhan määrätyt ehdot täyttyvät [24]. Keskeinen ero MARA- ja EEJ-menettelyjen välillä on siinä, että MARA-asetuksen betonimurske luokitellaan edelleen jätteeksi, jolloin sen käyttö vaatii ilmoituksen valvovalle viranomaiselle. [24.]

MARA-asetuksen mukainen betonimurske sisältää käyttökohderajoitusten lisäksi erilaisia teknisiä vaatimuksia. Esimerkiksi murskekerroksen sallittu

paksuus on määritelty 1,50 metriin. Tämän lisäksi rakenne on päällystettävä asfaltilla tai muulla pintamateriaalilla. [24.]

4.3 Betoroc

Rudus Oy on valmistanut betonijätteestä kehittämänsä Betoroc-mursketta jo 1990-luvulta lähtien. Betoroc on CE-merkitty kierrätysmurske, jota valmistetaan betonin ja tiilen kierrätyksen lopputuotteena. Tuotteen valmistusprosessi sisältää betonijätteen vastaanoton, murskauksen, seulonnan ja laadunvarmistuksen, jonka jälkeen materiaali on käyttövalmista rakentamiseen. Tuotteella voidaan korvata luonnon sora- ja kalliomurskeita, ja sitä käytetään muun muassa katu-, tie- ja kenttärakenteiden kantavissa sekä jakavissa kerroksissa. Rakenteellisesti Betoroc tarjoaa jopa 15–25 % parempaa kantavuutta kuin luonnonkivimateriaalit. [25.]

Murske ei ainoastaan vähennä luonnonmateriaalien tarvetta, vaan toimii lisäksi hiilidioksidineluna sitomalla itseensä merkittävän osan sementin valmistuksessa syntyneistä hiilidioksidipäästöistä. LCA Consulting Oy:n tutkimuksen mukaan Betoroc-murske voi sitoa jopa puolet sementin valmistuksessa syntyneistä päästöistä, mikä tekee siitä hiilinegatiivisen rakennusmateriaalin. Tämä tarkoittaa, että Betorocin valmistuksen yhteydessä syntyvä kokonaispäästö määrä on pienempi kuin siihen sitoutuva hiilidioksidimäärä. [26.]

4.4 Ympäristölupakäytännöt kierrätysalueella

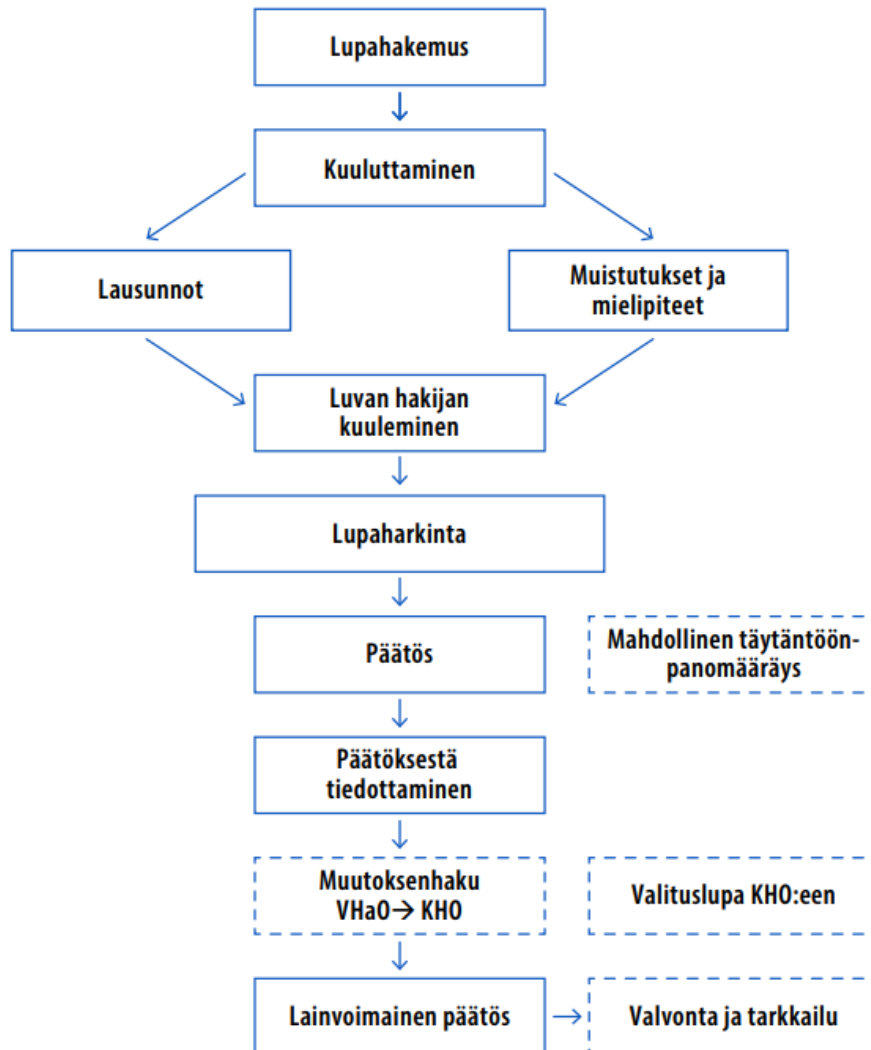
Ympäristölupaa on haettava, mikäli toiminnasta aiheutuu vaaraa ympäristölle tai ympäristön pilaantumiselle. Ympäristölupa on lainsäädännöllinen keino varmistaa, että ympäristölle haitallista toimintaa harjoitetaan hallitusti ja säädellysti. Lupaa vaativat toiminnot määritellään ympäristönsuojelulaissa ja -asetuksessa. Niihin lukeutuvat muun muassa kemianteollisuus, elintarvikkeiden valmistus, energiantuotanto, jätevesien käsittely sekä erilaisten jätteiden ammattimainen tai laitospäinen käsittely ja hyödyntäminen. Myös betonijätteen käsittely kuuluu näihin toimintoihin, koska prosessi voi aiheuttaa ympäristövaikutuksia, kuten

pölyä, melua, pintavesien saastumista tai maaperän emäksisyyden muutoksia. [27.]

Betonijätteen käsittelyn kuuluessa ympäristöluvan piiriin, jokaiselle betonijätettä käsittelevälle toimipisteelle on haettava ympäristölupa ennen toiminnan aloittamista. Lupaprosessin yhteydessä arvioidaan toiminnan mahdolliset vaikutukset paitsi ympäristöön, myös alueen asukkaisiin ja muuhun elinympäristöön. Luvassa määritellään yksityiskohtaisesti muun muassa sallitut toiminnot, ympäristönsuojelutoimet, valvonta- ja raportointivelvollisuudet sekä päästörajat veteen, ilmaan ja maaperään. [27.]

Ympäristölupahakemuksen laatii toiminnanharjoittaja, usein yhdessä ulkopuolisten asiantuntijoiden kanssa. Lupahakemuksesta kuulutetaan viranomaisen verkkosivuilla ja usein myös paikallisessa sanomalehdessä. Lisäksi tieto toimitetaan asianosaisille, kuten kiinteistönomistajille, joihin toiminta voi erityisesti vaikuttaa. Hakemuksesta voi esittää muistutuksia ja mielipiteitä 30 päivän ajan ennen asian siirtymistä lupaviranomaisen käsittelyyn. [27.]

Lupaviranomainen tekee päätöksen ympäristöluvasta kuulemisten, lausuntojen ja muistutusten perusteella kuvan 5 mukaisesti. Päätöksessä voidaan määrätä ehtoja toiminnan laajuudelle, aikataululle tai ympäristön seurannalle. Lupapäätöksestä voi valittaa Vaasan hallinto-oikeuteen ja edelleen korkeimpaan hallinto-oikeuteen, mikäli valituslupa myönnetään. Lupaprosessi varmistaa, että kaikki osapuolet tulevat kuulluiksi ja että toiminta voidaan toteuttaa ympäristön kannalta kestäväällä tavalla. [27.]



Kuva 2. Ympäristölupamenettelyn vaiheet [28].

Rudus Oy:n kahdella betonijätteen vastaanottopisteellä ympäristölupa velvoittaa ulos johdettavan veden laadunvalvontaan. Luvassa on määrätty, että vedestä tarkkaillaan pH-arvon lisäksi muun muassa sähkönjohtavuutta ja öljyhiilivetyjen pitoisuuksia. Betonijäte voi vaikuttaa ympäristön ja veden pH-arvoon ja lisätä veden johtokykyä, sillä se sisältää runsaasti emäksisiä yhdisteitä.

Riskien vuoksi alueilla tehdään pH-mittauksia säännöllisesti. Ympäristöluvan määräämät mittaukset suorittaa ulkopuolinen valvontahenkilö kahdesti

vuodessa. Tiedot tuloksista toimitetaan vuosiraportoinnin yhteydessä ELY-keskukselle ja ympäristönsuojeluviranomaisille.

5 Veden laadunvalvonta ja pH-mittaus

5.1 Taustaa

Toimipisteillä, joissa lupa velvoittaa vedenlaadun seurantaan ja muutoksiin reagoimiseen, noudatetaan erityistä tarkkuutta raja-arvojen saavuttamiseksi ja ylläpitämiseksi. Tämän vuoksi ulkopuolisten mittausten lisäksi toimipisteillä toteutetaan jatkuvaa omavalvontaa, jonka avulla mahdollisiin poikkeamiin voidaan puuttua nopeasti. Omavalvonta parantaa reagointinopeutta ja täydentää viranomaisvalvontaa etenkin äkillisten säätilojen tai muiden poikkeavien tilanteiden aikana.

Valuma-altaiden pohjalle on asennettu automaattinen hiilidioksidin syöttöjärjestelmä, jonka avulla veden emäksisyys voidaan neutraloida hallitusti. Prosessi mahdollistaa veden käsittelyn ennen sen poistumista ympäristöön, ja täten pystytään toimimaan ympäristöluvan mukaisesti.

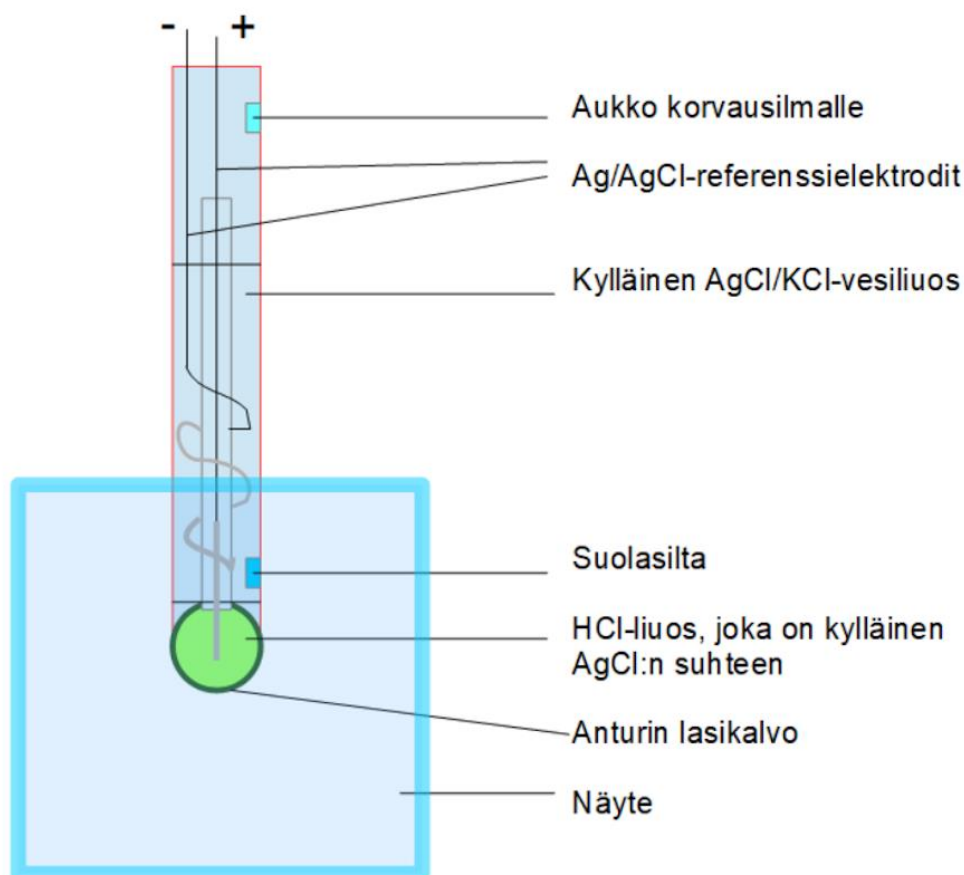
5.2 pH-mittauksen perusteet

Omavalvonnassa käytetään pH-mittaria, joka mittaa veden vetyioniaktiivisuutta. Tämä muunnetaan pH-arvoksi, joka kuvaa nesteen happamuutta tai emäksisyyttä. Ensimmäiset askeleet pH-mittauksen kehityksessä otti Max Cremer vuonna 1906, kun hän havaitsi, että kahden nesteen väliin asetetulla lasikalvolla syntyy sähköpotentiaali, jota voidaan mitata. Tämä havainto loi perustan lasielektrodin kehitykselle. Varsinaisen pH-asteikon kehitti tanskalainen kemisti Søren Sørensen vuonna 1909. [29.]

pH-arvolla ilmaistaan liuoksen happamuusastetta, ja se on logaritminen arvo vetyionien (H^+) konsentraatiosta liuoksessa. Neutraali liuos, kuten tislaamaton puhdas vesi 25 °C:n lämpötilassa, on pH-arvoltaan 7. Alle pH 7:n olevat liuokset

ovat happamia, kun taas yli 7:n olevat liuokset ovat emäksisiä eli alkalisia. Koska asteikko on logaritminen, yhden pH-asteikon muutos vastaa kymmenkertaista muutosta vetyionien konsentraatiossa.

pH-mittari (kuva 3) koostuu tyypillisesti kahdesta elektrodista: mittauselektrodista ja vertailuelektrodista. Mittauselektrodi, joka on usein lasista valmistettu elektrodi, reagoi liuoksen vetyionien kanssa ja muodostaa vertailuelektrodin ja mittauselektrodin välille potentiaalieron. Vertailuelektrodi tarjoaa vakaan ja tunnetun potentiaalin, jonka avulla voidaan mitata mittauselektrodin jännitteen muutos. Jokainen yhden pH-yksikön muutos vastaa noin 59,16 mV:n muutosta elektrodien välillä mitatussa jännitteessä, kun mittaustemperatura on 25 °C. Nykyaikaisissa pH-mittareissa on usein sisäänrakennettu lämpötila-anturi, joka korjaa lämpötilan mittauksen tarkkuuteen. [29.]



Kuva 3. pH-mittari yksinkertaistettuna [30].

Teoreettisesti pH-mittauksen perustana toimii Nernstin yhtälö (kaava 3), joka kuvaa elektrodille muodostuvan potentiaalin suhteen ionikonsentraatioon liuoksessa [31]. Nernstin yhtälö voidaan esittää muodossa:

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln Q \quad (3)$$

jossa E on mitattu elektrodiin muodostuva potentiaali (V), E^0 on elektroditasapainon standardipotentiaali, R on yleinen kaasuvakio (8,314 J/mol·K), T on absoluuttinen lämpötila kelvineinä (K), n on siirtyvien elektronien määrä reaktiossa, F on Faradayn vakio (96 485 C/mol) ja Q on reaktio-osamäärä, joka kuvaa ionien suhteellista konsentraatiota.

5.3 pH-mittauksen työvaiheet

Toimipisteillä tulee suorittaa pH-mittauksia viikoittain, jotta automaatiojärjestelmän toimivuus ja mahdolliset poikkeamat voidaan havaita ajoissa. Mittausten avulla seurataan, että hulevesialtaiden vesi pysyy ympäristöluvan määrittämässä raja-arvoissa, ja tarvittaessa voidaan ryhtyä korjaaviin toimenpiteisiin.

Mittauspäivinä tulee ensimmäisenä tarkkailla ympäristöolosuhteita, sillä säätilat voivat vaikuttaa veden ominaisuuksiin. Esimerkiksi pitkä kuivuusjakso voi tiivistää lietettä altaan pohjalle, kun taas voimakkaat rankkasateet voivat sekoittaa lietekerroksia ja nostaa veden mukana kiintoaineita, jotka vaikuttavat pH-tasoon. Myös silmin havaittavat muutokset, kuten veden sameus tai kelluvat epäpuhtaudet, tulee kirjata ylös ja huomioida tulosten tulkinnessa.

Jokainen mittaus alkaa pH-mittarin huolellisella kalibroinnilla ja puhdistuksella, jotta saadaan mahdollisimman tarkka ja luotettava tulos. Puskuriliuokset ja muut tarvittavat välineet tulee säilyttää puhtaissa ja tiiviisti suljetuissa astioissa, suojassa auringonvalolta ja lämpötilanvaihteluilta. Väärin säilytetyt tai vanhentuneet liuokset voivat aiheuttaa virheellisiä kalibrointeja ja sitä kautta virheellisiä mitaustuloksia.

Näytteenottoa suoritetaan hulevesialtaan virtaavasta vedestä. Mikäli suora mitaus ei ole mahdollista, voidaan käyttää teleskooppivarrella varustettua pulonoudinta, jolla näyte otetaan puhtaaseen astiaan. Mittaaminen on suoritettava mahdollisimman nopeasti tai näyte on säilytettävä asianmukaisesti, sillä ilmasta absorboituva hiilidioksidi voi vaikuttaa näytteen pH-arvoon. Kenttänäytteenotossa on toimittava huolellisesti ja järjestelmällisesti, jotta näytteestä saadaan edustava ja tulokset ovat vertailukelpoisia.

Mittauksiin on käytetty YSI EcoSense pH100M -kenttämittaria, joka on suunniteltu pH-, mV- ja lämpötilamittausten suorittamiseen kenttäolosuhteissa [32]. Elektrodi ei saa päästää kuivumaan, sillä kuivuminen voi vaurioittaa sen herkkyyttä huomattavasti. Kun mittari ei ole käytössä, elektrodi tulee säilyttää asianmukaisessa nesteessä, esimerkiksi pH4 -puskuriliuoksessa tai kaliumkloridiliuoksessa. Ennen näytteenottoa on tärkeää varmistua, että mittari on kalibroitu tarkkuuden ja luotettavuuden varmistamiseksi. Käytössä oleva pH100M-mittari kalibroidaan kaksipistekalibroinnilla liitteen 1 mukaisesti.

Kalibrointi tehdään käyttämällä standardoituja pH-puskuriliuoksia, joiden arvot ovat yleensä 4,01, 7,00 ja 10,01. Mikäli on ennakoitavissa, että näyte on mahdollisesti hyvin emäksinen, mittari voidaan kalibroida käyttäen 12,4 pH:n puskuriliuosta. [32.]

Kalibrointi aloitetaan huuhtelemalla elektrodi ionivaihdetulla vedellä. Ionivaihdettu vesi on puhdistettua vettä, josta on poistettu liuenneet ionit ioninvaihtohartsien avulla. Tämän jälkeen elektrodi kuivataan varovasti ja asetetaan pH 7 -puskuriliuokseen, jolla kalibroidaan mittarille nolllapiste. pH 7 -liuoksessa mitausjännitteen tulisi olla lähellä 0 mV. Seuraavaksi valitaan joko hapan (pH 4) tai emäksinen (pH 10) puskuriliuos riippuen siitä, kummalla alueella mitattavan näytteen odotetaan olevan. [32.]

Kalibrointia varten on otettava käyttöön kertakäyttöiset 20 ml:n kalibrointiliuokset, jotka ovat hygieenisia ja helppoja käyttää. Liuosten pieni koko säästää tilaa ja vähentää kontaminaation riskiä, kun toimitaan betonijätteen läheisyydessä. Kalibroinnin jälkeen mittari on valmis käyttöön. Jokainen kalibrointi

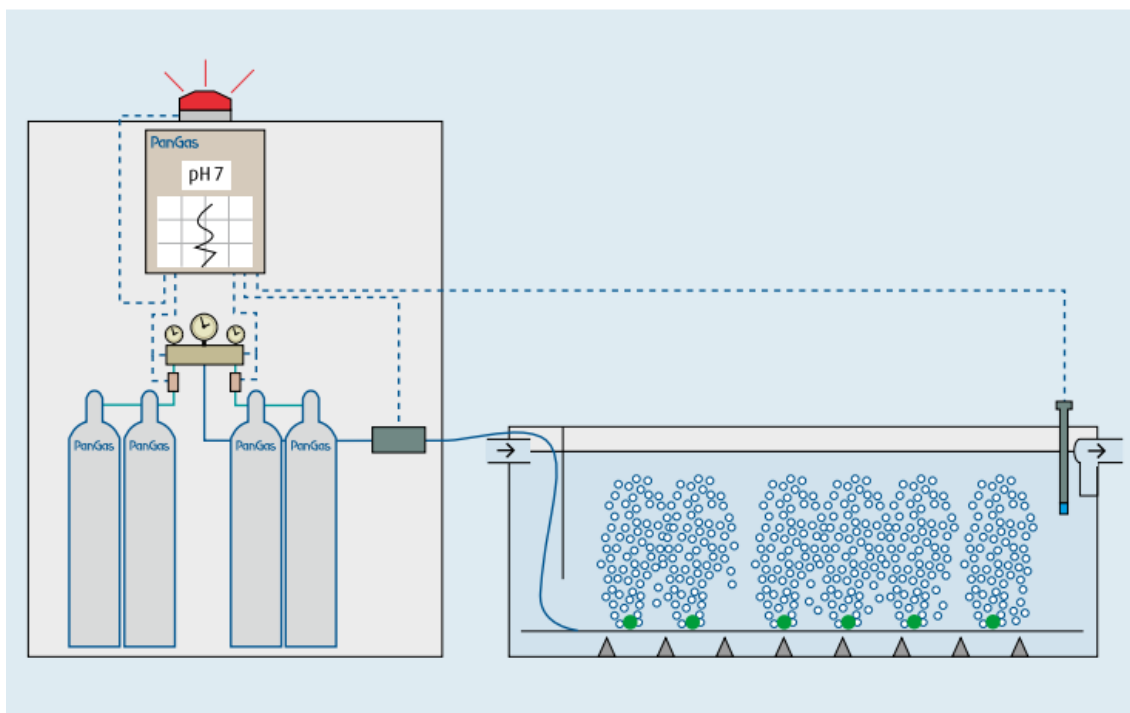
dokumentoidaan erilliselle kalibrointiseurantalomakkeelle, jotta voidaan seurata mittalaitteen käyttöä ja havaita mahdolliset kalibrointivirheet.

5.4 Automaatiojärjestelmän rooli ja sen käyttö

Betonin sementti sisältää kalsiumhydroksidia, joka on voimakkaasti emäksinen yhdiste. Ympäristöhaittojen ehkäisemiseksi ja vesistöjen suojelemiseksi on tärkeää neutraloida betonista maaperään ja vesistöön muodostuva emäksisyys. Tähän tarkoitukseen käytetään hiilidioksidia (CO_2), joka liuetessaan veteen muodostaa hiilihappoa (H_2CO_3), joka alentaa veden pH:ta.

Hiilidioksidin käyttö on tehokas ja hallittu tapa laskea veden emäksisyyttä ympäristöluvan asettamien raja-arvojen sisälle. Tämän vuoksi valvontaa vaativille toimipisteille on rakennettu automaattiset pH-seuranta- ja hiilidioksidinsyöttöjärjestelmät, jotka säätelevät pH-arvoa valuma-altaissa reaaliaikaisesti. Järjestelmä tunnistaa pH-arvon muutokset ja säättää hiilidioksidin syötön tarpeen mukaan (liite 2) mukaisesti.

Rudus Oy:n toimipisteillä on käytössä Linden SOLVOCARB®-säätökaapit, jotka on räätälöity kohdekohtaisesti. Laitteisto sijaitsee erillisessä kontissa (kuva 4), jonka sisällä puoliautomaattinen kaasukeskus syöttää huleveteen hiilidioksidia, kun keskukselle annettu pH:n raja-arvo ylittyy. Konttiin on asennettu kaksi hiilidioksidipullopakettia, joita järjestelmä tyhjentää yksi kerrallaan. Kun ensimmäinen pullopaketti tyhjenee, järjestelmä vaihtaa syötön automaattisesti toiseen. Samalla kaasukeskus lähettää signaalin SECCURA-kaukovalvontajärjestelmään, jota kautta Linden kuljetuslogistiikka saa tiedon vaihtotarpeesta, mahdollistaen huoltovapaamman ylläpidon.



Kuva 4. Käytössä oleva järjestelmä yksinkertaistettuna [33].

Kaasukeskuksesta (kuva 5) hiilidioksidi ohjautuu SOLVOCARB®-säätökaapille (kuva 6), jossa hiilidioksidi siirtyy esilämmittimen kautta paineensäätimelle. Paineensäätimen tehtävänä on varmistaa kaasun syöttöpaine, joka on oletusarvoisesti 6 bar. Paineensäätimen jälkeen kaasu kulkee rotametrin läpi. Rotametri on mekaaninen virtausmittari, joka näyttää kaasun tilavuusvirran visuaalisella asteikolla. Lopuksi kaasu saavuttaa on-off -venttiilin, joka on kytketty säätökaapissa olevaan Elmacron AB:n valmistamaan pH-analysointiin (malli 203RE).



Kuva 5. AGA (Linde) -kaasukeskus.

Järjestelmän pH-mittauksen toteuttaa Elmacronin PPK/G-HA anturi, joka on suunniteltu erityisesti korkean pH:n ympäristöihin [34]. Anturin toimintakykyä tulee seurata viikoittain nostamalla mittari vedestä ja puhdistamalla se liasta. Automaatiojärjestelmän anturin kalibrointi toteutetaan vuosittain Linden ohjeiden mukaisesti. Vuosittaisen huollon aikana tulee huoltaa myös paineensäädin ja varmistaa varoventtiilin toiminta.

Anturi on upotettu valuma-altaaseen, ja sen johto on vedetty kontilta veden läheisyyteen. Koska veden pinta voi vaihdella ja anturi on herkkä vaurioitumaan, mittari tulee kiinnittää kelluvalle alustalle, joka pitää anturin oikeassa syvyydessä ja mahdollistaa sen helpon nostamisen huoltoa tai talvisäilytystä varten. Anturin johto tulee myös koteloida, jotta se ei hajoaisi muuttuvissa sääolosuhteissa.

Talvikaudella on huomattu haasteita automaatiojärjestelmän kanssa, minkä myötä järjestelmää on suositeltavaa käyttää käsisyötöllä pitkien pakkasajanjaksojen aikana. Kovien pakkasten aikana valuma-altaat jäätyvät, eikä automaattinen näytteenotto ole mahdollista ilman, että riskinä on anturin hajoaminen. Näissä olosuhteissa anturi poistetaan käytöstä ja siirretään varastoitavaksi, kunnes mittausolosuhteet ovat paremmat.

Kenttämittausta tulee suorittaa, mikäli se on mahdollista. Kaasunsyöttöä voi suorittaa tarvittaessa manuaalisesti, joka takaa järjestelmän käytettävyyden ympäri vuoden. Tulevaisuutta varten tulee kehittää erillisiä säilytysratkaisuja ja tutkia mahdollisuuksia automaatiojärjestelmän käyttöön talven aikana.

6 Kehitystoimenpiteet ja johtopäätökset

6.1 Automaatiojärjestelmän käytön ja pH-mittaamisen kehittäminen

Jotta betonijätteen ja ympäristön voidaan hallita tehokkaasti ja vastata ympäristöluvan vaatimukseen, pH-mittauksen ja automaatiojärjestelmän käytön kehittäminen on ensiarvoisen tärkeää. Tällä hetkellä käytössä oleva järjestelmä toimii

teknisesti luotettavasti, mutta sen tehokkuus ja toimivuus riippuvat pitkälti säännöllisestä huollosta, kalibroinneista ja tarkasta käyttöohjeiden noudattamisesta.

Keskeinen kehityskohde on viikoittaisen pH-mittauksen rutiinin selkeyttäminen ja kalibroinnin laadun varmistaminen. pH-mittarin kalibrointi on edellytys tarkalle mittaukselle, ja puutteet kalibroitiprosessissa voivat johtaa virheellisiin lukemiin ja sen myötä tarpeettomaan hiilidioksidin syöttöön. Viikoittaista kenttämittausta ei ympäristöluvissa edellytetä, mutta omavalvonnalla pystytään ennakoimaan muutoksia ja valmistautumaan viranomaisen määräämiin mittauksiin.

6.2 Henkilöstön ohjeistus

Yksi merkittävimmistä kehittämistoimenpiteistä liittyy henkilöstön ohjeistukseen ja käytännön koulutukseen. Aiemmin automaatiojärjestelmän käyttö ja pH-mittausprosessit ovat perustuneet pitkälti suulliseen tiedonsiirtoon ja eri toimijoiden toimittamiin dokumentteihin. Tämä on johtanut tilanteeseen, jossa toimintatavat eivät ole täysin yhtenäisiä tai toistettavia.

Jotta mittaukset ja järjestelmän hallinta voidaan toteuttaa laadukkaasti kaikissa olosuhteissa, opinnäytetyön yhteydessä on luotu kirjalliset ohjeistukset keskeisistä toimenpiteistä (kuva 7). Nämä ohjeet toimivat sekä uusien työntekijöiden perehdytyksen tukena että kokeneempien työntekijöiden muistilistana.

Veden pH-mittaamisen ohjeistus

Ohjeistuksessa käydään läpi kohta kohdalta hulevesien pH-mittaamiseen liittyvät osa-alueet.

1. Valmistelut ennen mittausta
2. pH-mittarin kalibrointi
3. pH-mittaus vedestä
4. Automaatiojärjestelmän pH-kalibrointi
5. Automaatiojärjestelmän pH-rajan säätö
6. Mittauksen jälkeinen toiminta
7. Tulosten syöttäminen järjestelmiin



Rudus
A CERIN COMPANY

Kuva 7. Ohjeistuksen sisällysluettelo.

Luotu tiedosto sisältää pH-mittarin kalibrointia varten laaditun suomenkielisen ohjeistuksen (kuva 8) ja seurantalomakkeen, johon merkitään kalibroinnin päivämäärä, suorittajan nimi, käytetyt puskuriliuokset sekä elektrodin kalibrointiparametrit kulmakerroin ja pH 7 -arvon mV-nollapoikkeama. Tämä mahdollistaa laitteiden kunnon ja mittaustarkkuuden jatkuvan seurannan ja tuo toistettavuutta käytäntöihin. Lomakkeen avulla on myös helpompaa tunnistaa mahdolliset poikkeamat kalibrointikäyrissä ja ryhtyä korjaaviin toimenpiteisiin.

YSI EcoSense pH100M –mittarin kalibrointi

1. Tarkista, että pH-mittari on säilytetty asianmukaisesti ja, että elektrodi on ehjä
2. Huuhtelee elektrodi tislattulla vedellä ja kuivaa kevyesti puhtaalla paperilla
3. Käynnistä mittari ja yhdistä elektrodi laitteeseen
4. Paina **Mode** kunnes "pH" tulee näkyville
5. Mittaa nollapiste upottamalla elektrodi pH 7 puskuriliuokseen. Kun tulos stabilisoituu, paina ja pidä pohjassa **Stand/Recal** kolmen sekunnin ajan
6. Huuhtelee elektrodi
7. Mittaa kontrollipuskuri joko pH 4 tai pH 10 puskuriliuoksella riippuen kumpi on lähempänä mitattavaa ainetta. Betonijätteen tapauksessa pH 10. Kun tulos stabilisoituu, paina **Slope**
8. Kalibroinnin jälkeen tarkista elektrodin herkkyys painamalla ja pitämällä pohjassa **Meas./Effic.** viiden sekunnin ajan

HUOM! Kalibrointi on tehtävä aina ennen mittausta



Rudus
A CEM COMPANY

Kuva 8. pH-mittarin kalibrointiohjeistus.

Nykyinen Excel-pohjainen mittaustuloslomake päivitettiin visuaalisesti selkeämmäksi ja toiminnallisesti kattavammaksi. Lomakkeeseen lisättiin mittauskalenteri, joka määrittää mittausviikot ja toimii tarkastuslistana viikoittaisille tehtäville.

Automaatiojärjestelmälle laadittiin oma käyttöohje, jossa kuvataan vaiheittain muun muassa pH-rajan säätäminen, manuaalinen kaasusyöttö ja anturin kalibrointi. Käytännönläheinen ohjeistus vähentää virheitä ja helpottaa järjestelmän hallintaa esimerkiksi poikkeusolosuhteissa.

7 Yhteenveto

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää Rudus Oy:n kierrätysyksikön laadunvalvontaa erityisesti betonin käsittelyn ja veden pH-mittauksen osalta.

Työssä käytiin läpi betonin valmistukseen liittyviä ympäristövaikutuksia, kuten tuotantoprosessin hiilidioksidipäästöjä sekä sen vaikutuksia maaperään ja vesistöihin. Betonin kierrätys, kuten Betoroc-murskeen valmistus, tarjoaa merkittäviä mahdollisuuksia vähentää neitseellisten raaka-aineiden käyttöä ja pienentää koko rakentamisen ympäristöjalanjälkeä.

Eryistä huomiota kiinnitettiin veden laadunvalvontaan ja pH-mittaukseen, joka on keskeinen osa ympäristöluvan vaatimusten täyttämässä. Työssä kartoitettiin pH-mittauksen teknisiä perusteita, kuten mittauselektrodin toimintaa, mittausprosessin vaiheita ja siihen käytettäviä laitteita. Lisäksi käsiteltiin käytössä olevan automaatiojärjestelmän toimintaa veden pH:n säätelyssä ja esitettiin konkreettisia kehitysehdotuksia mittauksen tarkkuuden ja järjestelmän toimintavarmuuden parantamiseksi.

Kehitystoimenpiteiden tuloksena laadittiin selkeä ohjeistus pH-mittauksesta ja automaatiojärjestelmän käytöstä sekä otettiin käyttöön mittaustulosten dokumentointiin ja kalibroitiseurantaan tarkoitetut lomakkeet. Näiden toimenpiteiden avulla pyritään varmistamaan laadukas ja johdonmukainen toiminta koko henkilöstön kesken sekä parantamaan ympäristövastuullisuutta Rudus Oy:n kierrätysyksikössä.

Lähteet

1. Historia. Verkkoaineisto. Rudus Oy. <<https://www.rudus.fi/rudus-yrityksena/historia>>. Luettu 13.4.2025.
2. Rudus vastuullisuuskatsaus 2023. Verkkoaineisto. Rudus Oy. <<https://www.rudus.fi/Download/34185/Rudus%20vastuullisuuskatsaus%202023.pdf>>. Luettu 13.4.2025.
3. 2024 Annual Report. Verkkoaineisto. CRH plc. <<https://www.crh.com/media/5582/crh-2024-annual-report.pdf>>. Luettu 13.4.2025.
4. Kierrätyksen palvelut ja tuotteet asiakkaiden tarpeisiin. Verkkoaineisto. Rudus Oy. <<https://www.rudus.fi/tuotteet/kierratys/kierrätyksen-palvelut-ja-tuotteet-asiakkaiden-tarpeisiin>>. Luettu 13.4.2025.
5. Rakentamisen kiertotalous. Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö. <<https://ym.fi/rakentamisen-kiertotalous>>. Luettu 13.4.2025.
6. Pitkänen, Peppi. 2020. Betonin valmistuksen päästöt ja niiden vähennyskeinot. Kandidaatintyö. Tampereen yliopisto. <<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/156361/PitkanenPeppi.pdf?sequence=2>>. Luettu 13.4.2025.
7. Tarkka, Kai. Suomen betonipäästöt ovat nolla vuonna 2050. Verkkoaineisto. Kivifaktaa. <<https://kivifaktaa.fi/suomen-betonipaastot-ovat-nolla-vuonna-2050/>>. Luettu 13.4.2025.
8. Johdatus pH-arvoon. 2019. Verkkoaineisto. Canna Research. <<https://www.canna.fi/articles/johdatus-ph-arvoon>>. Luettu 19.4.2025.
9. Betoni on maailman käytetyin rakennusmateriaali. Verkkoaineisto. Finnsementti. <<https://finnsementti.fi/ymparisto/betoni-on-maailman-kaytetyin-rakennusmateriaali/>>. Luettu 14.4.2025.

10. Keskinen, Hanna-Leena; Raunio, Anne; Forss, Sonja; Kartano, Linda; Karttunen, Krister; Kokko, Aira; Kontula, Tytti; Koskela, Kasper; Mäkelä, Katriina; Pykälä, Juha; Rytteri, Terhi & Väänänen, Maaret. 2024. Luonnonsuojelulain luontotyyppien inventointiohje. Verkkoaineisto. Ymparisto.fi <https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/LSL_luontotyyppien_inventointiohje_luonnos20240515.pdf>. Luettu 17.4.2025.
11. Net Zero Cement. Verkkoaineisto. Net Zero Industry. <<https://netzeroindustry.org/net-zero-cement-methodology-and-key-implications/>>. Luettu 18.4.2025.
12. Sementti ja kasvihuonepäästöt. Verkkoaineisto. Betoniteollisuus ry. <<https://betoni.com/tietoa-betonista/betoni-rakennusmateriaalina/sementtiseosaineiden-kaytto/>>. Luettu 18.4.2025.
13. The road to low-carbon concrete. 2022. Verkkoaineisto. Ars Technica. <<https://arstechnica.com/science/2022/11/the-road-to-low-carbon-concrete/2/>>. Luettu 18.4.2025.
14. Rehman, Sardar; Ibrahim, Zainah; Memon, Shazim; Aunkor, Toasin; Javed, Muhammad Faisal; Mehmood, Kashif & Ali, Syed. 2018. Influence of Graphene Nanosheets on Rheology, Microstructure, Strength Development and Self-Sensing Properties of Cement Based Composites. Verkkoaineisto. Research Gate. <https://www.researchgate.net/figure/Chemical-composition-of-cement_tbl1_323781498>. Luettu 14.4.2025.
15. Tuohino, Jukka. 2024. Lisäaineiden käyttö vähähiilisten betonien valmistuksessa. Verkkoaineisto. Betoniyhdistys. <https://www.betoniyhdistys.fi/media/kurssit/betonilaborantti-ja-myllari-paivityskurssi/lisaaaineet_vahahiilissa_fincaa_2024-09.pdf>. Luettu 18.4.2025.
16. Helenin viimeinen kivihiilivoimala sammuu Salmisaassa päättäen hiilen aikakauden. 2025. Verkkoaineisto. Helen

- <<https://www.helen.fi/uutiset/2025/helenin-viimeinen-kivihillivoimala-sammuu-salmisaassa-paattaen-hiilen-aikakauden>>. Luettu 18.4.2025.
17. Masuunikuona. Verkkoaineisto. Betonitieto. <<https://www.betonitieto.fi/kirjasto-ja-sanasto/betonisanasto/masuunikuona.html>>. Luettu 20.4.2025.
18. Karbonatisoituminen. Verkkoaineisto. Betonitieto. <<https://www.betonitieto.fi/kirjasto-ja-sanasto/betonisanasto/karbonisoituminen.html>>. Luettu 18.4.2025.
19. CO₂NCRETE SOLUTION Kirjallisuustutkimus. Verkkoaineisto. CO₂NCRETE SOLUTION. <<https://betoni.com/wp-content/uploads/2024/11/CO2NCRETE-SOLUTION-kirjallisuustutkimus-L.pdf>>. Luettu 26.4.2025.
20. Kiertotalous. Verkkoaineisto. Betoniteollisuus ry. <<https://betoni.com/betoni-ja-ymparisto/kiertotalous/>>. Luettu 26.4.2025.
21. Elementtirakentamisen historia. Verkkoaineisto. Elementtisuunnittelu. <<https://www.elementtisuunnittelu.fi/download/22002/elementtirakentamisen%20historia.pdf>>. Luettu 14.4.2025.
22. Kannattaako korjata vai purkaa ja täydennysrakentaa? A-Insinöörien selvitys yllättää. 2020. Verkkoaineisto. Rakennuslehti. <<https://www.rakennuslehti.fi/2020/06/kannattaako-korjata-vai-purkaa-ja-taydennysrakentaa-a-insinorien-selvitys-yllattaa/>>. Luettu 14.4.2025.
23. Valtioneuvoston asetus betonimurskeen jätteeksi luokittelun päättymisen arviointiperusteista. 2022. 466/16.6.2022.
24. Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maanrakentamisessa. 2017. 843/7.12.2017.

25. Betoroc-murskeohje 2023. Verkkoaineisto. Rudus Oy. <<https://www.rudus.fi/Download/32403/Betoroc-murskeohje%202023.pdf>>. Luettu 14.3.2025.
26. Betoroc-murske hiilinegatiivinen: Espoonväylän rakentamisessa valtava päästösäästö. 2021. Verkkoaineisto. Rudus Oy. <<https://www.rudus.fi/ajankohtaista/2021/11/29/betoroc-murske-hiilinegatiivinen-espoonvaylan-rakentamisessa-valtava-paastosaasto>>. Luettu 13.4.2025.
27. Ympäristölupa. Verkkoaineisto. Aluehallintovirasto. <<https://avi.fi/asioi/henkiloasiakas/luvat-ilmoitukset-ja-hakemukset/vesi-ja-ymparisto/ymparistolupa>>. Luettu 18.4.2025.
28. Syyt yli vuoden kestäneisiin ympäristölupahakemusten käsittelyaikoihin aluehallintovirastoissa 2018–2020. 2021. Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/163634/YM_2021_35.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Luettu 18.4.2025.
29. pH-Mittari. 2019. Verkkoaineisto. Lohand Biological <<http://fi.lhmeter.com/info/ph-meter-principle-44392900.html>>. Luettu 18.4.2025.
30. pH-mittari. 2024. Verkkoaineisto. Kemisteri. <<https://www.kemisteri.fi/uncategorized/ph-mittari/>>. Luettu 18.4.2025.
31. Nernst Equation. Verkkoaineisto. ChemTalk. <<https://chemistrytalk.org/nernst-equation/>>. Luettu 18.4.2025.
32. EcoSense pH100M. Verkkoaineisto. YSI. <<https://www.ysi.com/File%20Library/Documents/Manuals/YSI-pH100A-pH100M-User-Manual-English.pdf>>. Luettu 18.4.2025.

33. Solvcarb®. Verkkoaineisto. Linde. <https://static.prd.echannel.linde.com/wcsstore/CH_REC_Industrial_Ntl_Store/medien/de_CH/pan-gas-solvocarb-e.pdf>. Luettu 19.4.2025.

34. Electrode system 80. Verkkoaineisto. Elmacron AB.
<https://www.elmacron.com/pdf/system_80E.pdf>. Luettu 19.4.2025.


pH-mittarin kalibrointiohje


pH Calibration

The pH100A /pH100M uses a 2-point calibration. The first point must be a 6.86/7.00 buffer, and the second either a 4.00/4.01 or 9.18/10.01.

1. Turn the unit on. Connect the pH electrode to the BNC connector and the ATC/Temp probe to the ATC/Temp connector of the unit; "ATC" displays. Press **Mode** until "pH" displays. AUTOLOCK may be on or off as desired.
2. Place the pH and ATC/temp probes into the first buffer solution (either 7.00 or 6.86). Allow temperature readings to stabilize, then press and hold **Stand/Recal** for 3 seconds to calibrate. If AUTOLOCK is off, the first point has been calibrated. If AUTOLOCK is on, "WAIT" flashes until the unit detects a stable reading. Once the unit calibrates the first point "SLOPE" flashes.

*Note: If no temperature probe is connected, adjust the temperature reading to that of the first buffer using the up or down arrow keys (0.0 to 60 °C) BEFORE pressing **Stand/Recal**.*

3. Rinse the pH and ATC/temp probes in distilled water, then place into the second buffer solution (either 4.01/4.00 or 10.01/9.18). Allow temperature readings to stabilize, then press **Slope/** to calibrate. If AUTOLOCK is off, the second point has been calibrated. If AUTOLOCK is on, "WAIT" flashes until the unit detects a stable reading. Once the unit calibrates the second point, the unit beeps once and both "STAND" and "SLOPE" display steadily.

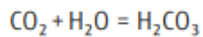
*Note: If no temperature probe is connected, adjust the temperature reading to that of the second buffer using the up or down arrow keys (0.0 to 60 °C) BEFORE pressing **Slope/**.*

4. The unit calculates and compensates for the pH electrode slope deviation corresponding to the values of the two calibration buffers. The unit is now dual-point calibrated and ready for measurements. After calibration, press and hold **Meas./Effic.** for about 5 seconds to display the new electrode efficiency.

Emäksisyyden neutralisointi

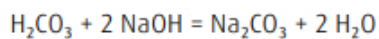
Mode of action of the neutraliser carbon dioxide

In aqueous solution, carbon dioxide is mainly present in the form of a dissolved gas. Small amounts are chemically converted into carbonic acid according to the following formula.



If the pH is greater than 9, carbonic acid dissociates to produce two protons, which are released for neutralisation. Only one proton is produced if the pH is less than 9. Although neutralisation occurs in a continuous process, it can be divided into three stages in terms of the chemistry:

Stage 1: (pH > 11,80)



Here the carbonate ion (CO_3^{2-}) is almost exclusively present.

Stage 2: (8,30 < pH < 11,80)



The proportion of hydrogen carbonate (HCO_3^-) rises as the pH drops.

Stage 3: (pH < 8,30)

In the third stage, the proportion of free, dissolved carbon dioxide increases constantly. The neutralisation curve flattens out. Below pH 5, physically dissolved carbon dioxide is almost exclusively present. The third stage is not usually reached as the legally required pH is higher.