Kasvien kommunikointi

BVOC-yhdisteet kommunikaation välineenä

Tekijät: Aiko Aunola, Pihla Hakulinen, Olivia Lehto, Nafsika Magaliou

27.3.2025
Science-kurssin tutkielma
Otaniemen lukio
Espoo

Kasvien kommunikointi

BVOC-yhdisteet kommunikaation välineenä

Sisällysluettelo

		sivu
1.	Kasvien kieli: Viestit ja tuoksut ilmassa	3
2.	Kasvit suojautuvat ja kommunikoivat	4
3.	Mitä BVOC-yhdisteet ovat?	5
4.	BVOC:t kommunikaation välineenä	6
5.	Miten asiaa tutkitaan	8
6.	Yhteenveto ja tehtävät	9
7.	Lähdekritiikki ja prosessi	10
8.	Lähteet	11

Kasvien kieli:
Viestit ja tuoksut ilmassa

Kuvittele käveleväsi keväisessä koivumetsässä. Ilmassa leijailee tuttu nuoren koivun tuoksu. Oletko koskaan miettinyt, mistä tuoksu johtuu, tai miksi se on evoluutiossa kehittynyt? Vaikka tuoksu onkin mieluisa, se ei ole kehittynyt ihmisten hajunystyröiden iloksi. Koivu käyttää tuoksua esimerkiksi kutsumaan petoja, jotka syövät kasville haitallisia tuholaisia eli herbivoreja. Tämän tuoksun aiheuttavat kaasut, joita kasvit levittävät ympäristöönsä. Kasvit päästävät näitä yhdisteitä ilmaan muun muassa stressireaktiona ja vaurioitumisen seurauksena. Yhdisteiden tehtävänä on silloin viestiä ympäröivälle kasviyhteisölle mahdollisesta vaarasta. Näillä kasvien erittämillä pienen pienillä BVOC-yhdisteillä on puolustuksen lisäksi monia muitakin vaikutuksia ekosysteemeissä. Esimerkiksi alailmakehän otsonikerros on ainakin osittain BVOC-yhdisteiden tuotosta. On myös tutkittu, että yhdisteet voivat tehdä pilvistä kirkkaampia ja viilentää paikallista ja globaalia ilmastoa. Näin pilvien heijastuskyky, albedo, paranee jarruttaen ilmastonmuutosta.



Kasvit suojautuvat ja kommunikoivat keskenään

Kasvit viestivät ympäristössään monin tavoin. Tämä tapahtuu mm. kirkkailla väreillä ja voimakkailla hajuilla, valon heijastamisen ja säätelyn avulla, sekä erittämällä kemikaaleja. Signaaleja on siis useita erilaisia. Merkittävimpinä signaaleina pidetään kasvista haihtuvia yhdisteitä, BVOC:eja, joiden avulla ne varoittavat muita kasveja ja suojautuvat herbivoreilta.

Kasvit vastaanottavat informaatiota “aisteilla”. On todettu, että kasvit aistivat valoa ja painovoimaa sekä reagoivat kosketukseen. Kasvit voivat myös tunnistaa toisen kasvin vioittumisen BVOC:ien lisäksi sähkönjohtavuuden muutoksista. Tämän takia vioittuneen kasvin lähistöllä olevat kasvit suojautuvat paremmin herbivoreilta, kuin kauempana olevat. Juuri tällaista vioittumattomissa puissa kehittyvää puolustusreaktioita pidettiin osoituksena kasvien kyvystä aistia lähellä olevien yksilöiden hätä.

Kasvien “hätähuudot”, eli herbivorien hyökkäysten aiheuttamat haihtuvat yhdisteet, BVOC:it, ovat tärkeitä signaaleja. Kun herbivori vahingoittaa kasvia, kasvin puolustusgeenit aktivoituvat ja kasvista vapautuu ilmaan BVOC -yhdisteitä. Niillä houkutellaan paikalle petopunkkeja ja muita loispetoja, jotka saalistavat esim. kasveille haitallisia vihannespunkkeja. Samoilla yhdisteillä viestitään lähistöllä oleville kasveille vaarasta, jolloin nekin aktivoivat puolustusgeeninsä. Tämä puolustautumisreaktio todistaa, että kasvit ottavat vastaan ja lähettävät signaaleja toisilleen.

Kasvit ovat siis luonnossa aktiivisessa kanssakäymisessä keskenään. Kasveilla ei ole todistettu olevan tietoisuutta, mutta on katsottu, että niillä on jonkinlaista älykkyyttä. Kasvien älykkyyden nähdään olevan yksittäisten kasvisolujen parviälyä. Soluparvi kerää ympäristöstään tietoa, reagoi ja viestii. Haihtuvia yhdisteitä ja signaaleja voidaankin pitää kasvien alkeellisena omana kielenä.

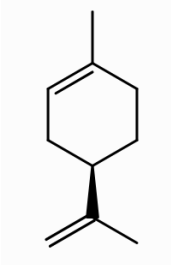
Mitä BVOC-yhdisteet ovat?

VOC, eli *volatile organic compound*, on yläkäsite, joka tarkoittaa ilmakehään haihtuvia orgaanisia yhdisteitä. BVOC taas tulee sanoista “biogenic volatile organic compound”, eli BVOC:it ovat elävien organismien, kuten kasvien, sienten ja mikrobien erittämiä (biogeenisiä) VOC-yhdisteitä. Eläimet eivät eritä BVOC-yhdisteitä, mutta ovat lajikohtaisesti kykeneviä reagoimaan niihin. Biogeenisten VOC-yhdisteiden tuottaminen on osa kasvien normaalia elintoimintaa.

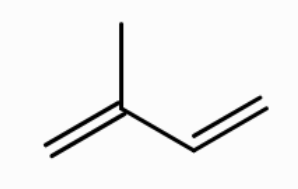
Osa tutkijoista jakaa BVOC-yhdisteet neljään ryhmään: terpenoidit, rasvahappojohdannaiset, fenyylipropanoidit ja bentsenoidit. Oleellisimpiin BVOC-ryhmiin kuuluvat bentsenoidit ja terpenoideihin kuuluvat isopreenit sekä mono- ja seskviterpeenit. Esimerkkejä luonnossa havaittavista BVOC-yhdisteistä ovat havupuiden metsäistä tuoksua aiheuttavat α-pineeni ja β-pineeni, sitrushedelmien erittämä limoneeni ja eukalyptuksen tuoksun aiheuttava eukalyptoli.

Kasvit tuottavat BVOC-yhdisteitä kaikista osistaan. Ihmisille helpoiten huomattavia ovat kuitenkin kukkien tuottamat, usein voimakkaalta tuoksuvat yhdisteet, joiden tarkoituksena on kutsua pölyttäjiä. Kukissa ja juurissa BVOC-yhdisteet muodostuvat useiten epidermisoluissa, eli kasvin ulkopintoja peittävässä solukerroksessa, mistä ne päästetään suoraan ilmakehään. Lehdissä BVOC-synteesi tapahtuu usein epidermin alla sijaitsevissa mesofyllisoluissa, joista ne päästetään ilmarakojen kautta tai kutikulan läpi ilmakehään.

Kasvit tuottavat BVOC-yhdisteitä suoraan sitomastaan hiilidioksidista. Osa sidotusta hiilestä siis palaa ilmakehään näiden yhdisteiden mukana, mutta vapautuneen hiilen kokonaismäärä on pieni verrattuna kasvin sitomaan hiileen. BVOC:it osallistuvat ilmakehässä erilaisiin prosesseihin ilmanlaatuun liittyen. BVOC-yhdisteet reagoivat alailmakehän otsonin kanssa muodostaen pienhiukkasia eli aerosoleja, jotka sirottavat auringonvaloa ja toimivat pilvipisaroiden tiivistymisytiminä, mikä viilentää ilmastoa paikallisesti. Toisaalta etenkin kaupunkiympäristössä BVOC:it voivat myös itse osallistua alailmakehän otsonin muodostumiseen. Yläilmakehässä otsoni suodattaa UV-säteilyä, mutta alailmakehässä se toimii kasvihuonekaasuna ja siitä voi aiheutua ihmisille terveydellisiä haittoja. Otsonia muodostuu, kun isopreenit ja monoterpeenit reagoivat liikenteen ja teollisuuden typpioksidien kanssa.



limoneenin rakenne



isopreeniyksikkö, terpeenit koostuvat isopreeniyksiköistä

Kasvien indusoituva puolustus ja kommunikaatio BVOC-yhdisteillä

Kasvit kommunikoivat BVOC-yhdisteiden avulla saman lajin muille yksilöille, interspesifisti muille kasviyhteisön lajeille, saman kasvin muille osille ja myös haitallisia herbivoreja syöville pedoille. Kun kasvi tulee herbivorien hyökkäyksen kohteeksi, lähettää se ilmaan kaasuja, joita vastaanottavat muut kasviyhteisön kasvit, saman kasvin terveet osat ja usein kyseisiä herbivoreja ravintonaan käyttävät pedot.

Syynä BVOC:ien kehittymiseen evoluutiossa on vaaroihin etukäteen varautuminen erilaisilla puolustuksilla. Kasvit välittävät tietoa niitä uhkaavista vaaroista, jotta muut kasviyhteisön yksilöt voivat aloittaa erilaisia puolustusmekanismeja. Puolustus voidaan jakaan peruspuolustukseen ja indusoituvaan puolustukseen. Peruspuolustus on kasveilla jatkuvasti käynnissä oleva kemiallinen mekanismi, joka torjuu monia yleisherbivoreja jatkuvasti erittämällä niitä torjuvia aineita. Osa herbivoreista on kuitenkin sopeutunut evoluutiossa kestämään näitä kemiallisen peruspuolustuksen aineita. Jatkuvasti käynnissä oleva peruspuolustus vie myös resursseja kasvin kasvulta. Näiden asioiden takia kasveille on kehittynyt tehokkaampi indusoituva puolustus.

Indusoituva puolustus toimii siten, että kasvin puolustusmekanismit aktivoituvat vasta kasvin vaurioituessa. Näin kasvi säästää energiaa ja resursseja, sillä puolustusmekanismeja ei tarvitse ylläpitää kokoaikaisesti. Indusoituvaa puolustusta on kahdenlaista: suoraa ja epäsuoraa. Suorassa indusoituvassa puolustuksessa kasvi alkaa tuottamaan lehtiinsä syöntiä haittaavia tai heikentäviä kemikaaleja ja torjuu siten herbivoreja. Epäsuorassa indusoituvassa puolustuksessa kasvi alkaa erittämään BVOC-yhdisteitä, jotka kutsuvat paikalle petoja, jotka käyttävät herbivoreja luontaisena ravintonaan.

Suora ja epäsuora indusoituva puolustus

Suora indusoituva puolustus vaikuttaa kemiallisesti suoraan hyökkääjään. Kasvi alkaa valmistamaan myrkyllisiä tai ruuansulatukselle haitallisia yhdisteitä syötyihin lehtiin tai muihin kasvin osiin. Kasvinsyöjiä karkottavia myrkkyjä ovat esimerkiksi alkaloidit (kuten nikotiini tupakkakasveissa), terpeenit ja fenolit. Toinen tapa karkottaa tuholaisia suoraan on tuottaa lehdissä ruuansulatusta heikentäviä proteiineja. Tuotetut proteaasi-inhibiitorit estävät herbivorin ruuansulatusentsyymien toiminnan ja keskeyttävät siten herbivorin kasvun. Kasvin suoraan indusoituvaan puolustukseen voi myös sisältyä rakenteellisia muutoksia. Kasvi voi tehostaa jo olemassa olevia puolustusmekanismeja kuten lehtien pinnalla olevaa ohutta karvakerrosta, soluseinien rakennetta tai pihkan ja maitiaisnesteen eritystä.

Kasvi kutsuu paikalle myös petoja ja parasitoideja syömään haitallisia tuholaisia. Tämä **epäsuora indusoituva puolustus** on yksi tärkeä tapa suojautua kasveja syöviltä tuholaisilta. Kommunikoiminen pedoille ja parasitoideille tapahtuu samoilla viestiaineilla kuin kasvien välinen kommunikoiminen. Yhteistyö petojen ja kasvien välillä viittaa tiiviiseen koevoluutioon lajien ja eliöryhmien välillä, eli siihen, että kasvien ja petojen evoluutio on tapahtunut rinnakkain. Esimerkki kasvilajin ja eläinlajin kemiallisesta yhteistyöstä on varpuslinnut, joita koivu kutsuu helpottamaan herbivoriastressiä, eli syömään koivulle haitallisia toukkia. Varpuslintujen tapauksessa koivu hyötyy siten, että sille haitallisia herbivoreja syödään ja varpunen taas hyötyy saamalla ravintoa toukista.

Kasvien kommunikaatio eläimille ja toisilleen

Muille kasveille vaaroista ilmoittaminen ei hyödytä suoraan varoittavaa kasviyksilöä. Hyödyt ympäröivälle kasviyhteisölle vaikuttavat kuitenkin positiivisesti myös hyökkäyksestä varoittavaan kasviin. Kasvilajin selviämisen kannalta onkin ollut evolutiivisesti merkittävää, että yksilöt toimivat yhdessä toistensa hyödyksi.

Kun kasvi havaitsee vaaran tai vaarasta viestiviä BVOC-kaasuja, se aloittaa indusoituvan puolustuksen. Se kuinka laajalle alueelle ympäröivässä ekosysteemissä kemialliset viestit levittyvät, riippuu monista tekijöistä. Yleisesti ottaen yksittäisen kasvin kommunikointiaineet ovat muille kasveille havaittavissa vain muutamien metrien etäisyydellä, mutta esimerkiksi tuulen voimakkuus vaikuttaa kaasujen leviämiseen. Kasvi-eläin -kommunikaatiossa yhdisteet voidaan havaita jopa satojen metrien päähän.

Kaikki kasvit eivät vastaanota BVOC:eja. Tällöin niitä vastaanottavat kasvit saavat valintaedun, kun ne pystyvät suojautumaan herbivoreilta etukäteen. Kuitenkin kyky vastaanottaa ja lähettää kemiallisia viestejä voi heikentää kasvin muita ominaisuuksia, kuten kylmänkestävyyttä ja resursseja kasvuun, eli kyvyllä voi olla epäsuotusia vaikutuksia kasvin kelpoisuuteen.

Kasvit voivat kommunikoida BVOC-yhdisteillä myös saman kasvin eri osille. Suurin osa kasviyksilön omasta kommunikoinnista tapahtuu johtosolukon kautta, mutta on myös havaittu, että jos yksi osa kasvista joutuu hyökkäyksen kohteeksi, viestii se kyseisen kasvin terveille osille myös ilmateitse kemiallisten yhdisteiden avulla. Ilmateitse viestiminen on johtosolukkoa nopeampaa, ja näin kasvin muut osat pystyvät nopeammin tehostamaan puolustustaan herbivoreja vastaan.

BVOC:eja voidaan käyttää myös muuhun kommunikaatioon kuin puolustukseen. Monet kasvit kutsuvat haihtuvilla yhdisteillä pölyttäjiä luokseen ja esimerkiksi kannukasvit houkuttelevat niillä saalista. Ihmiset voivat havaita näitä kaasuja ilmassa tuoksuina. Erityisesti kukkakasvit käyttävät tuoksuja pölyttäjien kutsumiseen. Esimerkki kasvin kommunikaatiosta pölyttäjille on ruusu, joka tuoksullaan kutsuu mehiläisiä ja perhosia pölyttämään.

BVOC-yhdisteiden tutkimus

Yleisimmin VOC- yhdisteitä mitataan kaasukromatografiapohjaisilla tekniikoilla, kuten kaasukromatografia-massaspektrometrialla. Kaasukromatografiset tekniikat ovat erotusmenetelmiä, joissa erottuminen perustuu aineen jakautumiseen kaasumaisen olomuodon, kantajakaasun sekä kiinteän faasin välillä. Kantajakaasu osallistuu tähän prosessiin toimimalla vain kuljettimena, joka kuljettaa näytettä analyysilaitteistossa.

Kaasukromatografia-massaspektrometria eli GC-MS on tarkka menetelmä, jota käytetään orgaanisten aineiden tunnistamiseen sekä niiden pitoisuuksien mittaamiseen.

Tämän kaltaisia mittauksia tehdään Suomessa SMEAR-asemilla (Station for Measuring Ecosystem-Atmosphere Relations). SMEAR-asemia on Suomessa neljä: Värriössä, Hyytiälässä, Helsingissä ja Kuopiossa.



Tämä Hyytiälän metsäasemalla oleva mittauslaite on ptr-ms kone (proton transfer reaction mass spectrometry), ja sen avulla voidaan mitata BVOC-yhdisteitä reaaliajassa ilman näytteiden valmistamista.

Yhteenveto ja tehtäviä

Kuten lähes kaikki eliöt, kasvitkin ovat sosiaalisia. Luonnonvalinta perustuu geenien siirtymiseen seuraaville sukupolville. Tällöin myös yksilön vaikutuksella sukulaisten menestykseen on väliä, koska sukulaiset kantavat todennäköisesti samoja geenimuotoja. Luonnonvalinta onkin suosinut kykyä jakaa tietoa muille kasviyhteisön yksilöille nopeasti ilmateitse. Tehokkaan kommunikaation myötä kasvilaji pärjää kilpailussa muita lajeja vastaan. Myös indusoituva puolustus tarjoaa lajille evolutiivisen valintaedun.

BVOC-yhdisteistä on vielä rajatusti tietoa, mutta tutkimus edistyy esimerkiksi Oulun ja Helsingin yliopistoissa sekä Ilmatieteen laitoksella. Osana tutkimuksia mitataan ilman BVOC-pitoisuuksia esimerkiksi Hyytiälän metsäasemalla.

Tehtäviä:

1. Miten BVOC-käsite eroaa VOC-käsitteestä?

VOC-yhdisteet ovat hiiltä sisältäviä, helposti ilmaan haihtuvia kemiallisia yhdisteitä, jotka voivat olla peräisin esimerkiksi luonnosta tai ihmisten toiminnasta. BVOC-yhdisteet sen sijaan ovat biogeenisiä VOC:eja, eli ne ovat peräisin luonnosta esimerkiksi kasvien tuottamina.

2. Mitä tehtäviä BVOC-yhdisteillä on?

BVOC-yhdisteiden tehtävänä on suojata kasveja, sekä osallistua niiden väliseen kommunikointiin. BVOC:it myös osallistuvat ilmakehän kemiallisiin reaktioihin muodostaen esimerkiksi otsonia sekä pilviä vaikuttaen näin ilmaston säätelyyn.

3. Miksi kasveilla on peruspuolustuksen lisäksi myös indusoiva puolustus?

Kasvin peruspuolustus on aina aktiivinen puolustusmekanismi, joka suojaa kasvia esimerkiksi taudinaiheuttajia vastaan. Indusoiva puolustus sen sijaan aktivoituu vasta kasvin kohdatessa uhan, kuten hyönteisen pureman. Kasville on resurssitehokkaampaa pitää vain jotain puolustusmekaneistaan yllä jatkuvasti.

Lähdekritiikki ja prosessi

Tutkijoiden kesken hieman ristiriitaisuutta: “Kasvitieteilijät kuitenkin pitivät kirjassa esitettyjä kokeita pääosin pseudotieteenä.” Esimerkki viittaa väitteeseen sähkönjohtavuuden muutosten tunnistamisesta. Jokainen tulkitsee kasvien kommunikointia myös eri tavoin. Osa puhuu siitä älykkyytenä, toiset refleksinä. Lähteissä käytetään siis ajoittain erilaista sanastoa kuvaamaan samaa ilmiötä.

Aihe on suhteellisen uusi, joten lähteitäkin oli rajallisesti. Löysimme kuitenkin jonkun verran tietoa netistä, ja sen kautta kuulimme myös kirjoista, joista oli hieman apua. Käytimme lähteenä paljon virallisia tutkimuslaitosten ja yliopistojen valmiita tutkimuksia sekä näiden liitteitä ja lähteitä.

Yksi tärkeimmistä lähteistämme oli Itä-Suomen yliopiston professorien laatima kirjoitelma kasvien kommunikaatiosta. Sen kautta otimme yhteyttä professoriin, Jarmo Holopaiseen, ja saimme häneltä apua epäselvissä asioissa. Holopainen lähetti meille kattavan sähköpostin aiheesta vastaten kysymyksiimme. Hän myös liitti sähköpostiin muitakin aiheeseen liittyviä tutkimuksia, joista oli tässä työssä apua.

Lähteissä myös mainittiin mahdollisista epäkohdista ja hankaluuksista, mitä tutkimuksissa tuli vastaan. Holopainen mainitsi viestissään: “Näissä vanhoissa tutkimuksissa ei ollut VOC-mittauksia, koska toimiva analytiikka oli vielä kehittymässä,” eli löytämistämme aineistoistakin puuttuivat analyyttiset tutkimukset: “Rhoades muistaakseni havaitsi, että perhostoukkien vioittamien kasvien viereisissä terveissä kasveissa oli vähemmän toukkia tekemässä vioitusta kuin etäämpänä olevissa kasveissa. Ei kemiallisia analyysejä.”

Haihtuvien yhdisteiden tutkiminen on osaltaan haastavaa, sillä mitattavat pitoisuudet ovat useimmiten hyvin pieniä. VOC-yhdisteet reagoivat herkästi muihin ilmakehän yhdisteisiin sekä valvontalaitteiden pintoihin. Tämän vuoksi mittaaminen kasvupaikalla on haastavaa ja kasvit on suljettava erityiseen tilaan, jossa ympäristön muu muutos (esim. valo) tai stressi eivät aiheuta virheellisiä tuloksia.

Tutkielmassa ei ole käytetty mittauksia tai analyyttisiä tilastoja.

Lähteiden tulkinta ja aiheeseen perehtyminen oli ajoittain raskasta, sillä tietoa tai tutkimuksia ei löytynyt kattavasti suomen kielellä ja niiden suorissa käännöksissä oli useasti merkittäviäkin virheitä. Suurin osa lähteistä oli kuitenkin englanniksi, joten niistä sai tarvittavat tiedot irti.

Lähteet:

https://www.cnr.it/en/focus/046-4/bvoc-biogenic-volatile-organic-compound-emission-responses-to-climate-change

https://www.duodecimlehti.fi/duo14409

https://scholar.google.fi/scholar?q=bvoc+in+plants+communication&hl=fi&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholart

https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749113001310

https://oulurepo.oulu.fi/bitstream/handle/10024/14592/nbnfioulu-202001081008.pdf;jsessionid=0F2D0A97BC3810EBB275227695

https://www.nature.com/articles/srep33851

https://www.ilmatieteenlaitos.fi/uutinen/1CTuTB6fwcrJrfeOiO57ay?utm_source=

https://kasvikset.fi/kasvitieto/kasvisten-sailytyksesta/etyleeni/

https://www.millefolia.fi/blogi/joulukuusi-ja-etyleeni

https://fi.wikipedia.org/wiki/Kaasukromatografia

https://acp.copernicus.org/articles/18/13839/2018/

https://www.ilmatieteenlaitos.fi/aerosoli-pilvi-ilmakehan-sateily-ryhma

https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9936147/

https://oulurepo.oulu.fi/bitstream/handle/10024/62891/nbnfioulu-202605263742.pdf?sequence=1