

Marc-André Seloisse

EI IIAL ÜKSI

**Mikroobid –
taimede, loomade ja ühiskonna alus**

Francis Hallé järelsõna



elav teadus

Originaali tiitel:

Marc-André Selosse

Jamais seul

Ces microbes qui construisent les plantes, les animaux et les civilisations

Copyright © Actes Sud 2017

Käesoleva teose väljaandmist on toetanud Prantsuse Suursaatkond ja Prantsuse Instituut Eestis

Tõlkija Kadri Koik

Toimetaja Marri Amon

Teadustoimetaja Maarja Öpik

Korrektor Sille Teiter

Kujundaja Jan Garshnek

Küljendaja Erje Hakman

Tõlge eesti keelde © Kadri Koik ja kirjastus Argo, 2021

Kaanefoto © Shutterstock

Kõik õigused kaitstud

www.argokirjastus.ee

ISBN 978-9949-688-48-7

Trükitud Tallinna Raamatutrükikojas

SISUKORD

SISSEJUHATUS.

HILINE AVAMÄNG: SÜMBIOOS JA MUTUALISM – ENNEKÕIKE AGA MIKROOBID	13
Õine püük kaaskonnaga	13
Klassifitseerimatud samblikud	15
Sümbioos laiemas tähenduses: koos elamine	17
Mutualism: heanaaberlikud suhted	18
Hiline avamäng ja mikroobide pooleliolev ehitusplats	20
Järgnevatel lehekülgedel... ..	22

1. MIKROOBSETE JUURTEGA HIIGLASED:

SEENED HOIAVAD TAIMI OMA LEIVAL	27
Mändide raske ümberasumine Euroopa kolooniatesse	27
Trühvlitest mükoriisani	29
Seened juures igal pool ja igal maal	31
Segasummasuvila: igaüks toob midagi lauale kaasa	33
Mükoriisa kui alltöövõtja	35
Võrgustikuks ühendatud taimed	38
Mükoriisavõrgustikud kui toitainetega varustajad	39
Mükoriisavõrgustikud kui kaudse abi jagajad	42
Kokkuvõtteks	44

2. VÄIKESED KAITSEVAD SUURI:

MIKROOBID TURVAVAD JA EHITAVAD TAIMI	47
'Kentucky 31', pealtnäha hea mõte, mis lõppes katastroofiga	47
Igavesti abielus... eriti just heas	50
Seened ja lestalised – lehtede mikroskoopilised kaitsjad	53

Mükoriisa kaitseb juurt mullamürkide eest	55
Bakterite ja seente ühisrinne mulla haigustekitajate vastu	57
Kaitsemikroobid mööda risosfääri laiali	60
Taime kaitsemehhanismidega manipuleerivad mikroobid	62
Mikroobid arengutsükli kõigis osades	65
Mikroobid, kes pügavad taimi	66
Kokkuvõtteks	69
3. 1+1>2: SÜMBIOOS KUI INNOVATSIOONIMOOTOR	71
Tühja koha pealt tekkinud lämmastik?	71
See, mida liblikõieliste puhul saab teha ainult sümbioos	74
Kui oled minuga, ei tunne sind enam äragi!	76
Laiendatud fenotüübist holobiondini	79
Taimed ei kiirusta veest väljatulekuga... ..	81
Kuidas seenjuured maailma muutsid	84
Teele külmale maale	87
Kokkuvõtteks	89
4. „OLE NII HEA, JOONISTA MULLE LEHM!“:	
PISIASJAD, MILLEST SAAB KOKKU	
ROHUSÖÖJA LOOM	93
Miks lehmad vahivad mõttelageda näoga ringi?	93
Vastastikune abi kahekesi söömisel	96
Lehma ökoloogiline ime	100
Mikroobid, mao ees või mao taga?	102
Siin saavutavad mõned pabulad ja pätsid kustumatu	
kuulsuse	106
Välisvats... ehk üks väike fantaasia?	109
Kokkuvõtteks	110
5. LOOMADE ELUKUNST KÕIKVÕIMALIKES PAIGUS:	
MIKROOBIDE KOHASTUMISEST MERE	
EKSTREEMSUSTEGA	113
Lõunamaa meresinas nälgimas	113
Viimast leivapalukest jagades	116
Korallid – loomne taimeimitatsioon	117

Taimloomad: elu päikese käes	120
Sügavusse vajunud ja bakterite toel püsti	123
Bakteriaalse ainevahetusega loomad	127
Külmalöörid ja juurtega loomad	129
Kokkuvõtteks	133

6. TOITUMISE PISTIKPROGRAMMID:

MIKROOBID KESET PUTUKATE MITMEKESISUST	135
Aedniksipelgate kiirteed	135
Üks pesa, üks sümbioos... kolmele	138
Seenekasvatavad sipelgad	140
Ühiskondlik sümbioos	142
Seentega taimede vastu	144
Bakteritega rämpstoidu vastu	147
Mikroobseid pistikprogramme nagu seeni pärast vihma	151
Koevolutiooni taandarenguspiraal	153
Kokkuvõtteks	156

7. INIMENE MIKROOBIDE VÕIMUSES (1):

MIKROBIOOTA KÕIKJALOLUST	159
Inimese mikroobsele käsitluse lähemale	159
Nahk – mikroobikiht ja kaitsebarjäär	161
Inimkeha sissepääsul	165
Kõigesööjast primaadi soolestiku mikrobiota	168
Soolestik – stabiilsuse ja muutuvuse vahel balansseeriv mikroobne ökosüsteem	170
Kuidas me ema abiga paneme kokku oma mikrobiota	173
Kokkuvõtteks	177

8. INIMENE MIKROOBIDE VÕIMUSES (2):

MIKROBIOOTA KÕIGEVÄELISUSEST	181
Soolestik kui sümbioosne seedesüsteem	181
Sümbioosne kaitse toidumürkide vastu	184
Mikrobiota juhib seda, mis saab toidust edasi	186
Ravivõtted, mis hoolitsevad (mõnikord kogemata) mikrobiota eest	190

Mikrobioota – kaitse... mikroobide vastu	192
Mikrobioota kasvatab ja harib immuunsüsteemi	194
Kuidas me talume sümbiooset mikrobiootat?	197
Mikroobid, kes mõjutavad hiirte arengut ja käitumist	200
... ja mikroobid, kes mõjutavad meie endi käitumist	202
Kokkuvõtteks	206

9. MIKROOBID MEIE RAKKUDE SEES: HINGAMISE JA

FOTOSÜNTEESI LÄTETEL	211
Miks maailm on nii roheline?	211
Kuidas maailm hingab	213
Ühe teooria kuri saatus	215
Lynn Margulis ja saatus pöördumine eukarüootide endosümbioosse päritolu kasuks	217
Mitokondrid: olemas igivanast ajast ja igaveseks	220
Geneetiline häving raku sisemuses	222
Ülima sõltuvuse lugu	224
Eukarüootne rakk – sümbioosne kimäär	226
Uuel ringil kloroplastid ja sekundaarne endosümbioos	228
Kloroplastide tants ja evolutsioon üle kivide ja kändude	230
Kokkuvõtteks	233

10. ÜKSINDUSE LÄVEL JA PARASIITLUSPÕRGU ÄÄREL:

SÜMBIOOSI KANDVAD MEHHAANISMID	237
Üksindusega toimetulek (1): ei iialgi lahus	238
Üksindusega toimetulek (2): ikka ja jälle uuesti liitu astumine	241
Sümbioosi pärimine või selle uuesti sõlmimine: üksindusega toimetulekuks pole ideaalset võtet... ..	245
Ärgem olgem naiivsed!	247
Võetakse see, kes arvas, et ise võtab	250
Peretülid	252
Survemeetmed ja bioloogilised tehingud	256
Jäägid – täiusliku teineteisemõistmise alus?	259
Elagu stress ja nälg!	261
Kokkuvõtteks	264

11. KAUGED, KUMMALISED VÕI HARJUMATUD LIITLASED: KUI ÜHTEDE HÄDAD TULEVAD KASUKS TEISTELE JA TEKITAVAD ÖKOSÜSTEEME	269
Tapjad pärmseened	269
Otsustajad mulla sees	272
Troopiliste metsade supermitmekesisus	275
Taimede liigirikkuse varjatud niiditõmbajad, haruldusest invasiivseks liigiks	278
Mikroobid taimkatte dünaamikas	282
Vaenlase vaenlased on sõbrad ka inimese puhul	285
Ajaloo kõige suurem bioloogiline sõda – vähetuntud genotsiid	287
Sümbiondid parasiteerimiseks ja tapmiseks	291
Kokkuvõtteks	294
12. MUTUALISTID TALDRIKUL JA KLAASIS (1):	
VEIN, ÕLU JA JUUST	297
Veiniteo pärmseened	297
Veinide arenemine mikroobide ja oksüdeerumise vahel	300
Mitmesugused õlled	304
Alkohoolne kääritamine – konvergentne (kultuuriline) evolutsioon	307
Jogurtist juustuni... ..	308
Mikroobid juustuvallutusel	311
Juustu laagerdamine – mikroobide töö	313
Elukunst juustu sees	315
Kokkuvõtteks	317
13. MUTUALISTID TALDRIKUL JA KLAASIS (2):	
TÄNAPÄEVASE TOITUMISE ALLIKATEL	321
Kääritamine kaitseks ebasoovitavate mikroobide eest	322
Kääritamine kaitseks mürkide vastu	325
Kääritamine, et toitu paremaks muuta	330
Käärimine: kultuuriline külgetõmme või bioloogiline kutse?.....	334
Kokkuvõtteks	337

JÄRELDUSED, MIDA POLE IIAL AINULT ÜKS.	
KAS NÄHTAV MAAILM POLE VAID MIKROOBSETE	
VASTASTIKMÕJUDE PINNAVIRVENDUS?	341
Mida sümbiontmikroobid meile just õpetasid?	341
Väikesed, arvukad, äärmiselt liigirikkad ja...	
kergesti hangitavad	344
Sõltuvus – möödapääsmatu olukord	348
Kas organismid on üldse veel olemas?	
Ehk kahe ookeani saladus	352
Elagu mikroobid!	357
Eine murul arvuka saatjaskonnaga: taasleitud mikroobid	361
FRANCIS HALLÉ JÄRELSÕNA	363
SÕNASTIK	371
MÕNED TEEVIIDAD TÄIENDAVAKS LUGEMISEKS	385
TÄNUAVALDUSED	387
AUTORIST	389

*Minu tagasihoidlik kirjatükk,
pühendatud Alicijale, kes annab maailmale värvi,
minu vanematele, kes mind sellesse maailma töid,
ja kõigile neile, kes tahavad seda mõista*

Lisaks eelnevale mõjutab mikrobiota ka inimestevahelisi suhteid ja sotsiaalsust. Nägime, et sotsiaalne elu jätab oma jälje meie mikrobiotale (vt eelmist peatükki), kuid mõju on ka teistpidine. Pöördugem esmalt veel korra tagasi loomade juurde, kelle puhul mõjutab mikrobiota täiesti selgesti isenditevahelisi suhteid. Akseenilistele hiirtele pakub puuri sattunud võõras hiir oluliselt vähem huvi kui tavalistele hiirtele – tundmatu võõras äratav tavaliste hiirte seas suurt tähelepanu, kuid akseeniliste hiirte jaoks on tuttav külaline sama huvitav kui võõras külaline. Mikroobid toodavad ka isendite suhteid reguleerivaid aineid feromoonide, mida harilikult valmistavad loomad ise. Suur hulk loomi, nende seas ninasarvikud, rebased ja kärplased (nirgi sugukond), kasutavad oma territooriumi tähistamiseks väljaheidete lõhna ning panevad seega enda eristamiseks osaliselt töösse ka oma mikrobiota ained. Putukatel reguleerivad mikroobsed ained osaliselt agregatsiooni (st liigisiseste rühmade moodustumist). Kõrbetirts (*Schistocerca gregaria*), üks seitsmest Egiptuse nuhtlusest, elab rändparvedena, ohustades Põhja-Aafrika ja Lähis-Ida põllumajandust ning need parved moodustuvad feromoon guaiakooli toimel, mida toodavad tirtsu soolestikubakterid. Sarnaselt tõrjuvad puudel parasiteerivad mardikalised (*Dendroctonus*'ed, st hiidüraskid ja 6. peatükis kohatud ürasklaste hulka kuuluvad *Ips*'id) oma nõrgemad konkurendid juba parateeritavalt puudelt eemale, eritades antiagregeriva (rühmi laiali ajava) toimega hormooni verbenooni, mida tekitab üks üraski kaevatud käikudes pesitsev pärmseen okaspuude vaigu muundamisel. Äädikakärbestele ellu sekkub mikrobiota feromooni kaudu kuni seksuaalpartneri valimiseni: kui panna omavahel segamini melassist toitunud isendid tärklise peal kasvanud putukatega, heidavad putukad eelistatavalt paari nendega, kes on samasugust toitu söönud. Eelistus kaob pärast antibiootikumiravi, kuid võib taastuda, kui akseenilist äädikakärbest nakatada teise äädikakärbe väljaheidetega: seksuaalpartneri valikul osutub määravaks kasutatud väljaheite päritolu. Tärkliserikka toidu peal konkurentsieelisesse sattunud piimhappebakterid arvatavasti muundavad paaritumise ajal ligi meelitavaid feromoonide. Selles näites võiks äädikakärbestele partnerivalik vastavalt toidule viia mõne aja pärast uute liikide väljakujunemiseni, kes

omavahel enam järglasi ei anna – mikrobioota mõjul aset leidvatel muutustel putukaisendite vahelistes suhetes on seega põhjanevad tagajärjed.

Inimese puhul on mikrobioota mõju omavahelistele suhetele veel täpselt välja selgitamata. Autism – häire, milles kannatada saab just suhtekäitumine, on aga siiski arvatavasti seotud mikrobioota mõjuga. Autismisspektri häirega inimeste mikrobioota koostis on eriomane, sellega kaasnevad üsna sagedasti seedeprobleemid, kusjuures antibiootikumide tarbimine leevendab osaliselt mõningaid autismi sümptomeid. Ka siinsel juhul on paranemine üksnes ajutine, kuid viib mõttele: vaatamata sellele, et mikrobioota ei ole autismi ainus ja esmane põhjus, on sellel oluline roll sümptomite avaldumises. Autismi laialdast levikut tänapäeval (kümme korda rohkem juhte kui 30 aastat tagasi) võiks hügieenihüpoteesi käsitluse järgi seletada mikroobide panusega: kui arengule kaasa aitavad bakterid koloniseerivad inimese liiga hilja ja ebapiisavas koguses, kinnistub aju ja mikrobioota ebaharilik talitamine. Esmajoones muudab niisugune teisenenud mikrobioota sooleseina limaskestast läbilaskvamaks ning osad kääritudestegevuse saadused pääsevad kehasse. Täpsemini öeldes pääsevad läbi just kinoliinhape ja künureenhape, mis häirivad aju talitlust: kui neid aineid hiirtele süstida, toob see kaasa autismi meenutavaid muutusi käitumises. Mikrobioota seesele ja inimese sotsiaalse käitumisega üldisemalt tuleb veel kinnitust saada, kuid kui see leiaks tõestust, ei oleks selles midagi imeks pandavat, arvestades meie teadmistega parasiitmikroobide kohta.

Mõned parasiitmikroobid mõjutavad meie käitumist küll. Toksoplasmoosi tekitav algloom *Toxoplasma gondii*, kes üldiselt tekitab haiguslikke seisundeid kaslastel ja närilistel, on selle elav tõestus. Närilistel, kes seda haigust põhiliselt edasi kannavad, kutsub see protist esile reaktsioonikiiruse languse ja huvi kassiuriini haisu vastu: närvisüsteemi pugununa programmeerib mikroob ümber lõhnareaktsioonid, millest saab isastel ootamatult seksuaalne erutus! Ja nõnda õnnestubki sel algloomal nakatada kasse, sest nad saavad nakatunud hiired kergemini kätte. Kui inimene nakatub toksoplasmoosi, ilmnevad tal küllaltki tagasihoidlikud sümptomid, välja arvatud juhul, kui see

toimub raseduse ajal. Parasiit jääb aga närvisüsteemi varjule ja kuigi ta ei saa kassile üle minna, viib ta närvisüsteemis läbi ülipeeni muudatusi. Ta halvendab tähelepanuvõimet (liiklusõnnetustesse satub suuremas proportsioonis nakatunud inimesi) ja vähendab meestel vastumeelsust kassiuriini lõhna suhtes, mis tuletab natukene meelde *Toxoplasma* mõju närilistele. Veelgi enam, ta suurendab (pisut) depressiooni ja skisofreenia väljakujunemise ohtu ning aeglustab lapse motoorika arengut... Mis puudutab käitumist inimsuhetes, siis on psühholoogiliste testide käigus ilmnenu, et see parasiit muudab mehed domineerivamaks (kahtlemata seepärast, et ta võimendab testosterooni sünteesi) ning naised usaldavamaks ja hoolivamaks.

Toodud näide ilmestab selgesti, mida võib korda saata tavaline mikrobioota, avaldades kord soodsamat, kord ebasoodsamat mõju. Lõpetagem paari väljakutsuva, kuid avameelse küsimusega meiega mängiva manipulatsiooni täpse ulatuse üle: kas bakterid, kes ajavad nutma imiku ja löövad paigast tema seedimise, ei tõmba vanemate tähelepanu lapsele mitte sellepärast, et neil endil on kõht tühi? Kas bakterid, kes põhjustavad rasvumist ja pärsivad täiskõhutunde tekkimist, ei manipuleeri meiega just seepärast, et ise rohkem süüa saada? Kas bakterid, kes soodustavad inimeste läbikäimist, ei aita mitte kaasa enda paremale levimisele inimeselt inimesele? See, kui sügavalt ja ulatuslikult mikroobid inimesega manipuleerivad, tuleb veel täpsemalt kindlaks teha, kuid märgid selle kohta on ilmselgelt juba praegu olemas.

KOKKUVÕTTEKS

Soolestiku mikrobiootat on pikka aega nimetatud kommensaalseks mikroflooraks (ld k *cum* 'koos' ja *mensa* 'laud'): kommensalismis all mõeldakse partnerite suhet, kus üks osapool saab kasu, kuid teine ei saa kahju. Aga oh häda! Kui organismis on arvukalt mikroobe, nagu rääkisime eelmises peatükis, käib sellega kaasas ka sama laialdaselt mõjusid, mis kõik on läbi põimunud füsioloogiaga. Mikroobid mõjutavad enamikku keha funktsioonidest: toitumist, immuunsust, muidugi ka arengut, käitumist ja isegi sotsiaalset läbikäimist... nii haiguses kui ka tervises. Viimasel ajal on plahvatuslikult suurenenud uurimuste

hulk, mis käsitlevad mikroobide vahetut ja mitmekülgset mõju, ning ei ilmu enam ühtegi Nature ega Science'i väljaannet, kus poleks sel teemal mõnd pikemat artiklit. Oleme mõjutanud nii süvitsi, et inimese füsioloogiat võib lausa nimetada sümbioosi käigus tekkinud uueks nähtuseks. Kas me üldse saame enam öelda: „meie ja me mikroobid“, kui nad on niivõrd „meie ise“? Ja kui ma ütlen „mina“, kes siis ikkagi räägib?

See, mida meile näitavad inimene ja hiir, kehtib kõigi loomade kohta, kelle füsioloogia alustalaks on samuti mikroobid: me ei hakka üksikjuhte nimetama, sest tihtipeale ei ole kõiki põhjalikult uuritud, kuid ka sellest vaatenurgast on inimene loom nagu kõik teisedki. Peale inimese n-ö loomse aspekti leiame mikroobset mõju ka raamatu alguses kirjeldatud taimede juures, kes samuti on juurtest kuni lehetippudeni mikroobidega asustatud ja nende abil üles ehitatud. Inimese soolestikku ja taimede risosfääri ühendab üks äärmiselt rabav sarnasus. Mõlemal juhul elavad ümbritsevast keskkonnast välja sõelutud ja ülimalt liigirikkad mikroobid uues keskkonnas, mille on loonud peremeesorganism, kelle toitumist ja immuunsust nad enda soovi kohaselt muundavad, mõjutades nii kaudselt tervet organismi ning teisendades selle arengut ja paljunemistki. Kõik suured elusolendid, taimed ja loomad, peidavad endas mustmiljon mikroobi, kelle meelevaldas on nad vaid mängukannid.

Jäägem selle võimsa ja osaliselt tõese võrdluse juures mõõdukaks ja ärgem korrakem mikrobiootaga seda viga, mis pani meid arvama, et keha on autonoomne üksus. Ka mikrobioota ei ole iseseisev, sest tal oleks väga keeruline üksi toituda ja end kaitsta. Mõju on vastastikune, sest me valime ja sorteerime välja oma mikroobid, igauks vastavalt oma geneetilistele iseärasustele, harjumustele (esmajoones toitumisharjumustele) ja kultuurile ning anname mikroobidele peavarju ja toitu... Seda vastastikust mõju peaks vaatlema tasakaaluna, sümbioosina, millest mõlemad osapooled sõltuvad ja mida mõlemad ka koos hoiavad.

Inimese jaoks on mikrobioota suurepärase tööriistakast, mida kasutada ümbritseva keskkonnaga kohanemisel: mikrobiotas tegutsevad külalised panevad mängu sada korda rohkem genee, kui

sisaldab meie enda genoom. Nad võivad seega märkimisväärselt muuta kogu keha talitlemist ja terve selle konsortsiumi omadusi, mille me koos nendega moodustame. Tänu partneritele, kelle seast me valiku teeme, on inimese käsutuses fantastiline virvarr geneetilistest kombinatsioonidest, millest mõned on kohastumuslikud: oleme näinud, kuidas mõned bakterid aitavad seedida norilehti või vabastada sojast pärit daidseiini mürkidest. Mikrobiota paneb igasuguse kahtluse kokku inimese laiendatud fenotüübi, mille mõned iseloomulikud nähtused, näiteks kometaboliidid, on tekkinud vastastikuse koostoime käigus.

Inimkeha aluseks on suures osas mikroobne ökosüsteem. Meie füsioloogia on kehas toimuvate ökoloogiliste mehhanismide tulemus: järkjärguline mikroobide kolonisatsioon lapseas, pidev konkurents, näiteks kõhulahtisuse ajal, ökoloogilise tasakaalu kõikuma löömine pärast antibiootikumiravi või muutusi toidusedelis, näiteks reisi ajal jne. Mõned ravivõtted on hakanud isegi selle ökosüsteemi kogu ökoloogiat töösse rakendama. See on karm õppetund nendele, kes soovivad haridussüsteemis õpetada ökoloogiat alles hilisemates õppeastmetes ettekäändel, et kõigepealt peaks olema ülevaade füsioloogiast, arengubioloogiast, paljunemisõpetusest, ühesõnaga organismide bioloogiast tervikuna. Ootamatult selgub siis, et arvestada tuleb mikroobide omavaheliste suhetega või mikroobide ja peremeesorganismi suhetega, mis määratlevad organismide bioloogia ühe osana komplekssest ökoloogiast. Ökoloogia ei ole nüüdsest enam organismide bioloogia alamüksus, vaid need valdkonnad on üksteise alustalaks nagu muna ja kana. Seega on tagumine aeg viia ökoloogiateadmised ka kõige väiksemate õppuriteni!

Tulevikus ei ole bakteritest abi üksnes põletikuliste, mikroobsete või allergiliste seedeprobleemide leevendamisel, vaid ka meeleolu ja isegi sotsiaalsuse parandamisel. Nüüdsest peaksime silme ees kandma pilti puhtast mustusest, mida eelmise peatüki lõpus tutvustasime ja mis kinnitab hügieeni eeliseid tervise tagamisel, kuid pakub heade bakterite sissetoomisega täiendavaid hüvesid. Just seda näitab hügieenihüpotees oma üksikasjaliku analüüsiga allergiate, autoimmuunhaiguste ja autismi seletamisel. Puhta mustuse talumine astub sama jalga inimese sisikonna igapäevase kaalutlemistööga, kui see peab maohappe,

soolestiku lima ja sapphapete abiga eraldama mikroobide hulgas terad sökaldest, kasutades ära mikroobidevahelisi tülisid... ja immuunvastust, kuid seda ainult viimases hädas. Igapäevaste otsuste nimekirjas, mida inimene peab langetama, on ka toiduainetega seotud valikud (sh kiudained ja mõõdukas steriliseerimine), laste puhul leppimine mõningase mustusega, mõõdukas puhastamine ja antibiootikumiravi kasutamine. Tulevikus on võib-olla kasutusel teised võtted, nende hulgas näiteks siirdamine (tervete doonorite mikrobiota ülekandmine haigetele) ja istutamine (prebiootikumid ja probiootikumid).

Mikroobid on meid küll vallutanud, kuid me pole bakterite olemasolu kaugeltki ammendavalt mõistnud. Järgmine teema, millest rääkima hakkame, puudutab loomade ja taimede sügavat rakusisemust ning paneb meid mõtlema üksteisest sõltuvale, iidvanale ja veel mõõtmatumale koevolutatsioonile mikroobidega.

MIKROOBID JUUSTUVALUTUSEL

Pärast juustu vormi asetamist hakkab pihta mikroobide töö – siin on erinevalt veinist ja õllest ametis tõeliselt mitmekesine mikroobide kooslus. Standardne juust sisaldab ühes grammis kümme miljonit mikroobi ja üks gramm koorikut sisaldab kuni üks miljard (10^9) mikroobi (Prantsusmaal neelame keskmiste toidukoguste juures alla kümme kuni sada miljardit mikroobi päevas)! Juustumassis, millele hapnik juurde ei pääse, käärivad bakterid ära selle, mis laktoosist järele on jäänud (suurem osa läks vadakuga välja) ning sellele järgneva äädik- või propioonkäärimise käigus vabanevad gaasid võivad tekitada juustus auke. Nii on lugu Emmentali ja Gruyère'i juustuga, milles käärimise käigus tekivad juustudele iseloomuliku maitse andvad süsihappegaas ja propioonhape. Emmentali ja Gruyère'i juustu vaheline erinevus seisneb juusturatta sees toimuva käärimise kiiruses: Gruyère'i juustu puhul aeglustatakse käärimisprotsessi, sest seda hoitakse jahedamates keldrites, kuid soojemas keskkonnas valmiva Emmentali puhul on käärimine kiirem. Tulemusena on Gruyère'i juustu puhul gaasidel aega eralduda, kuid Emmentali puhul tekitavad need suuri ümmargusi mulle (auke).

Juustukoorikule, kus hingamine on võimalik, asuvad bakterid ja seened elama vastavalt juustumeistri tehnoloogilistele sammudele. Kui juustu pealispinda pidevalt kraabitakse nagu Roqueforti puhul, ei teki sinna muud kui vaid õhuke bakterikirme. Mõõduka hõõrumise ja pesemisega tekitab mikroobide kolonisatsioon juustu pinnal biokile järjestikuste etappidena, mis moodustavad tõelise ökoloogilise järgnevuse (suktsessiooni). Esimesed asunikud on mitmesugused bakterid ja pärmseened, mis üherakuliste eluvormidena levivad kergemini; seejärel, kui hõõrumist vähendatakse, ilmuvad niidistikku moodustavad seened, nagu *Penicillium*'id (pintselhallitus), *Mucor*'id (nutthallitus) ja mitmesugused *Rhizopus*'ed (täpphallikud). Pikapeale ilmuvad mõnele kuivale juustule loomad, kes need vohama läinud mikroobid ära söövad: jahulestad, lestalised jt tarvitavad ära seened ja jätavad juustukooriku oma elutegevuse ja väljaheidete toimel pulbriseks; niiskemate juustude koorikut võivad asustada ussid, kes panevad nahka bakterid ja seened. Need hilisemad loomsed kolonisatsioonid juustul,

mis ei vasta just igale maitsele, ei mõjuta tihtipeale otseselt aroomi kujunemist, kuid näitavad, et juust on vana.

Niidistikku moodustavad seemned ei asu juustu koorele elama juhul, kui seda pidevalt kraabitakse, sest hüüfid purunevad kergesti: see jätab suktsessiooni üherakuliste ehk bakterite ja pärmseente staadiumi juures seisma. Väga tugev hõõrumine viib juustu pinnal kuiva biokile välja kujunemiseni, nagu näiteks Emmentali juustul; soolveega pesemisel, mis ei ole nii agressiivne viis, tekib venivam biokile, nagu Münsteri, Vieux-Lille'i ja Époisses'i juustul. Nende kolme juustu koorik, mis on väga tugeva lõhnaga ja oranžikat värvi, annab peavarju brevibakteritele – see seletab ka ära kooriku värvuse, sest koorikus on ohtralt karotenoide, ja lõhna, sest brevibakterid kõrvaldavad aminohapete üleliigse väävli lenduva metaanetiooli (CH_3SH) kujul. Lugejale tuleb võib-olla meelde, et needsamad bakterid tekitasid jalahaaisu 7. peatükis: mõne juustu ebameeldiv lõhn, nagu näiteks nende oranžika ja veniva koorikuga juustude oma, ei ole juhus... vaid sugulasmikroobide elutegevuse saadus, sest neile meeldib rammus valguline keskkond, nagu nahk ja juust ning nad kõrvaldavad toidust saadud üleliigse väävli CH_3SH kujul!

Kõik need mikroobid ilmusid algul juustudele iseenesest, lehma piimast ja udaralt, seejärel töötlemise käigus ja säilitamiskeskkonnast (õhk, kelder jne). Juhtub ka nii, et juustu istutatakse ümber: paljud kitsejuustutootjad segavad näiteks kalgendisse segu piimast ja vanadest juustukoorikutest. Alates XIX sajandist on osadesse juustudesse viidud spetsiaalselt valitud, hoitud ja kasvatatud seente (ja isegi bakterite) tüvesid. Nimetatud seente hulgast tõstame esile *Penicillium*'id, kes tekitavad valge kooriku või sinaka juustumassi. Veidral kombel kirjeldasid eelmise sajandi alguses just ameeriklased Prantsuse juustude pärmseeni ja panid seentele nende matkimiseks nimed *Penicillium roqueforti* ja *Penicillium camemberti*. Roqueforti juustu sisse viiakse näiteks kaks mikroobi korraga, käärimisbakterid ja *Penicillium roqueforti* eosed, mis lisatakse utepiima sisse enne kalgendamist (külvamine on tänapäevaste sinihallitusjuustude tootmisel üldlevinud meetod). Bakterid eritavad CO_2 ja tekitavad kalgendisse augud, mis lisanduvad juustuterade õhuvahedele kalgendis, mida sellisel juhul vajutuse alla ei

panda. Õhuvahed on omavahel ja väliskeskkonnaga ühendatud ning tekitavad noore juustu sisse auguplaati meenutavaid struktuure: soonte kaudu saab nüüd hingata, sellega soodustatakse *Penicillium*'i arengut, *Penicillium* aga jätab hallitusesoonte seintele oma sinakashallid eosed.

Tihti peale tulevad sinihallitusjuustude seenetüvede eosed hüüfide küljest halvasti lahti, mille tõttu jääb juustuaukude pinnale sinakas värvus ning lõikamisel tekib ilus kontrast valge juustumassiga. See tähendab, et *Penicillium*'i eosed levivad iseseisvalt ootamatult halvasti, kuid sellel ei ole enam erilist tähtsust, sest seent külwab tänapäeval niikuinii inimene selleks mõeldud ettekasvatatud kultuuridest (*Penicillium roqueforti* puhul pannakse kultuur käima saial). Teised *Penicillium*'id, nagu *Penicillium camemberti* satuvad tihti juustukoorkute peale, mis vanasti muutusid eoste tekkega hallikaks. Tänapäevased tüved hakkavad hiljem eoseid kasvatama ja on Camemberti, Brie ja Coulommier' de peal kaua aega valged. Nende tüvede selekteerimine oli XIX sajandi lõpu suur leid, sest pärlmutterja koorikuga juustud sobisid pariislaste toidulauale paremini kui hallide eostega kaetud juustud, mis määrisid taldrikuid... Näeme siin, et inimesega seotud *Penicillium*'ide võime iseseisvalt paljuneda väheneb, sest tänapäeval külwab ja levitab neid seeni inimene – samasugune lugu juhtus end putukatega sidunud seentega 6. peatükis – need jäid samuti ilma oma võimest iseseisvalt levida.

Tulgem aga nüüd mõju juurde, mida avaldavad juustule seal elavad mikroobid, kes satuvad sinna enam-vähem omal jõul.

JUUSTU LAAGERDAMINE – MIKROOBIDE TÖÖ

Mikroobid põhjustavad juustus muutusi pikema aja jooksul, esmalt selle konsistentsi osas. Bakterite polüsahhariidid, millest juba juttu on olnud, muudavad juustumassi kreemisemaks, nagu juhtub näiteks Cheddaris. Proteaasid lagundavad valke ja selle tulemusena vabanevad aminohapped, millest toituvad mikroobid. Valkude tükeldamise tulemusena muutub kalgend pehmemaks ja kõige vanemates juustudes isegi päris vedelaks. *Penicillium*'ide ja ka *Geotrichum*'ite tüved, mis tekitavad proteaase, on mõnikord väga hinnatud, sest need muudavad