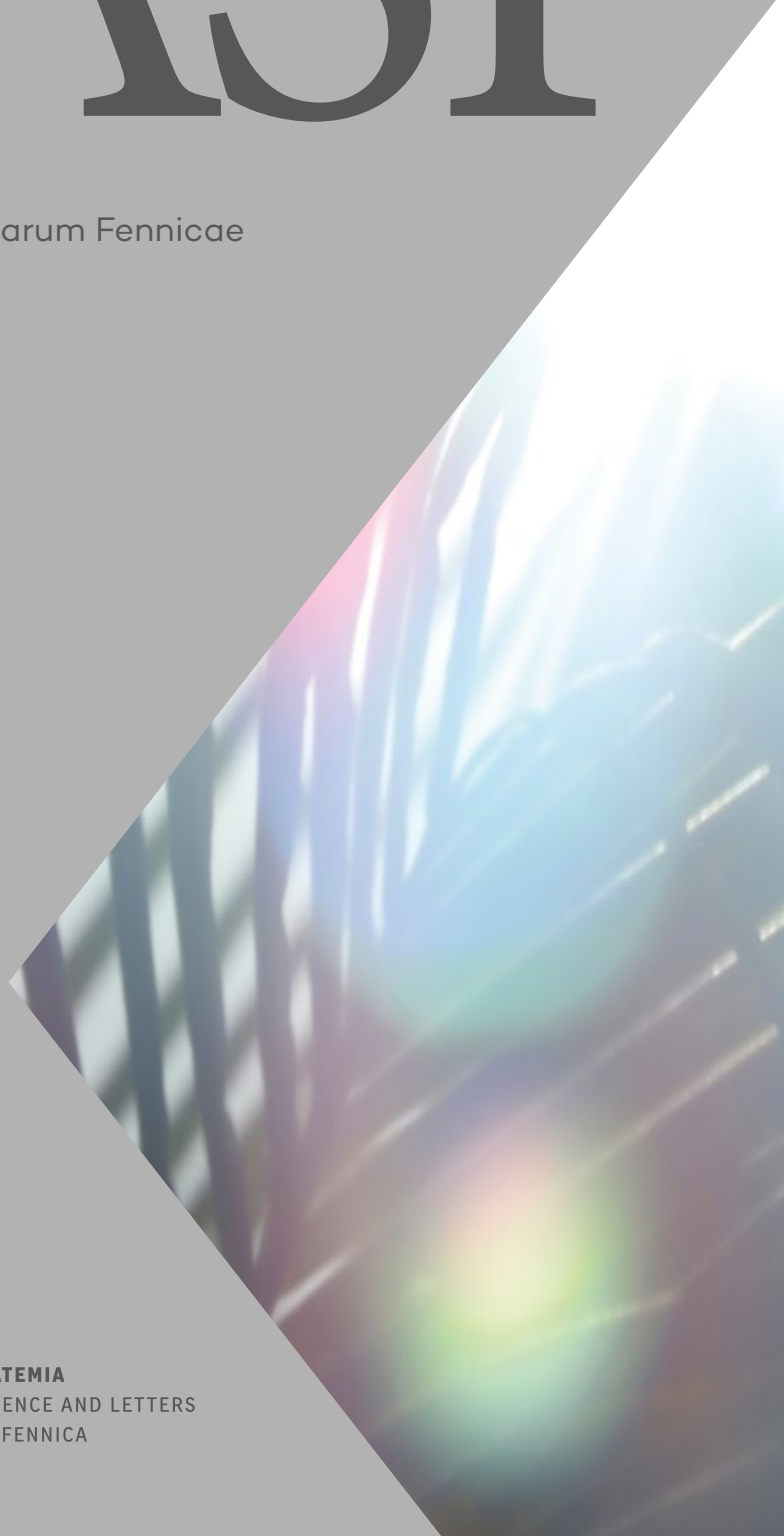


AASE

Annales Academiae Scientiarum Fennicae

No.1 — 2022



SUOMALAINEN TIEDEAKATEMIA
FINNISH ACADEMY OF SCIENCE AND LETTERS
ACADEMIA SCIENTIARUM FENNICA

Suomalainen Tiedeakatemia

Finnish Academy of Science and Letters
Academia Scientiarum Fennica
Mariankatu 5 A, FIN-00170 Helsinki
e-mail acadsci@acadsci.fi
www.acadsci.fi

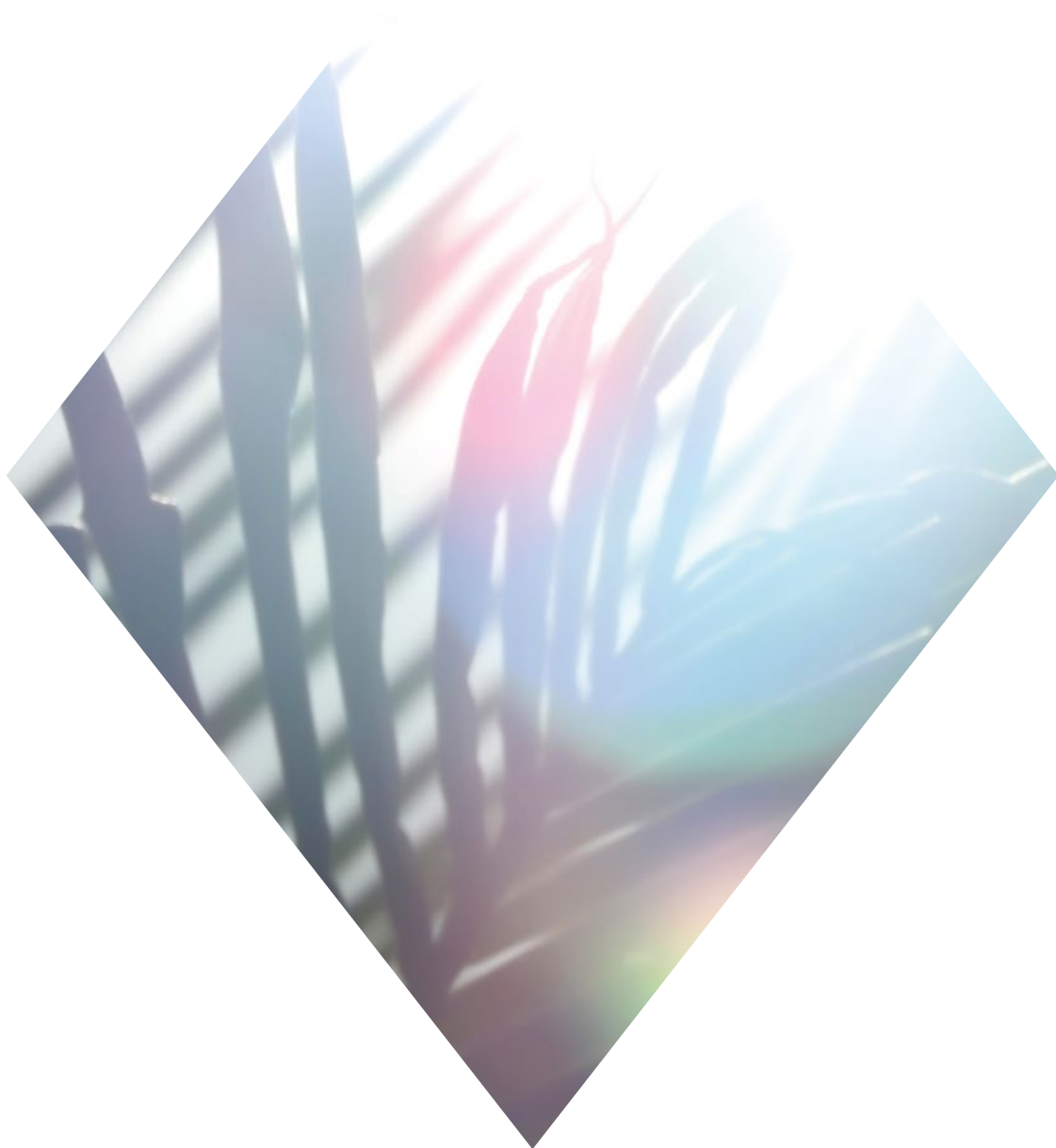
Toimitus

Päätoimittajat – Anna Mauranen ja Risto Nieminen
Toimitussihteeri – Anna Chydenius

AASF Annales Academiae Scientiarum Fennicae

Ilmestyy 2 kertaa vuodessa
AASF is also accessible on the internet, address: journal.fi

ISSN 2953-9048 (painettu/print)
ISBN 978-951-41-1179-2 (painettu)
ISBN 978-951-41-1180-8 (verkkójulkaisu)



Sisällys

-
- #1 Economic Degrowth and the Collapse of Institutional Order: Theory and Propositions
-
- #2 Femtometreistä valovuosiin: neutronitähdet eksoottisen aineen laboratoriona
-
- #3 Oikeusvaltio ja oikeusvarmuus Euroopan unionissa
-
- #4 Muistijälkien kirjoittaminen aivojen kovalevyllä unen aikana takkuilee Alzheimerin taudissa
-
- #5 Miten pyhä teksti toimii?
-
- #6 Analytisk kemi – några reflektioner
-
- #7 Preventing Spontaneous Preterm Birth: Insights from Genomics
-
- #8 Acid sulfate soils: A challenge for environmental sustainability

*Juha-Antti Lamberg, Nooa Nykänen ja
Jarmo Taskinen* **Sivu 10**

Aleksi Vuorinen **Sivu 28**

Juha Raitio **Sivu 44**

Heikki Tanila **Sivu 60**

Jutta Jokiranta **Sivu 76**

Johan Bobacka **Sivu 94**

Louis J. Muglia et al. **Sivu 108**

Markku Yli-Halla **Sivu 124**



Pääkirjoitus

Anna Mauranen

Risto Nieminen

Päätoimittajilta

Annales Academiae Scientiarum Fennicae (AASF) on Suomalaisen Tiedeakatemian julkaisusarja, jonka pitkä historia ulottuu Tiedeakatemian perustamiseen saakka. Tiedeakatemian yleisten tavoitteiden mukaisesti se haluaa edistää tieteidenvälistä vuoropuhelua ja välittää valistuneelle lukijakunnalle tietoa ajankohtaisista tieteellisen tutkimuksen kysymyksistä ja uusista haasteista. AASF:n myötä Suomalaisen Tiedeakatemian julkaisutoiminta palaa juurilleen ja ottaa samalla tähän aikaan sopivan muodon: se on monitieteinen, verkossa ilmestynvä aikakauslehti. Se on suomalainen, mutta ilmentää myös sekä tieteen lähtökohtaisesti kansainvälistä luonnetta että suomalaisen tiedeyhteisön kasvavaa kansainvälisyyttä. AASF julkaisee artikkeleita suomeksi, ruotsiksi ja englanniksi. Kaikki artikkelit käyvät läpi referee-käytännön.

AASF:n ensimmäiseen numeroon on koottu artikkeleita vuosina 2020 ja 2021 hyväksytyiltä uusilta Suomalaisen Tiedeakatemian jäseniltä. Näitä riittää seuraavaankin numeroon, mutta myös aiemmin valitut jäsenet, tänä vuonna valitut ja muut eturivin tutkijat voivat tarjota julkaisuun tekstejä, joissa he kertovat oman tutkimusalansa ajankohtaisista aiheista ja omista kiinnostuksen kohteistaan.

Tämän numeron artikkeleissa ovat mukana kaikki kolme julkaisukieltä sekä monipuolinen valikoima niin luonnontieteellisiä kuin humanistis-yhteiskunnallisiakin aloja. Ensimmäisessä **Juha-Antti Lamberg**, **Nooa Nykänen** ja **Jarmo Taskinen** tarkastelevat talouden supistumisen vaikutusta järjestelmien institutionaaliseen romahtamiseen. He esittävät aiheesta oman teoreettisen mallinsa, jota he soveltavat myös konkreettiseen historialliseen esimerkkiin Rooman valtakunnasta.

Seuraavaksi **Alexi Vuorinen** kuvaa kompaktien neutronitähtien fysiikkaa ja niiden ytimien kiehtovia ominaisuuksia äärimmäisen tiheän kvarkkiaineen mahdollisina laboratorioina. **Juha Raitio** puolestaan käsittelee oikeusvaltiollisuutta ja oikeusvarmuutta länsimaisten yhteiskuntien yleisinä periaatteina erityisenä näkökulmanaan oikeusteoria ja EU-oikeus Euroopan unionissa. **Heikki Tanilan** artikkeli kertoo aivotutkimuksen uusiin havaintoihin perustuvasta näkemyksestä unen tehtävästä, jossa korostuu se, miten unen aikana siirtyy muistikuvia tuoreista tapahtumista aivokuoren säilömuistiin.

Pyhiä tekstejä yhteisöllisessä kontekstissaan analysoi **Jutta Jokiranta**, joka korostaa yhteisön pyhiksi määrittämien tekstien syntyprosesseja ja tarkastelee niitä muuttuvina ja uusiutuvina resursseina, joiden arvovaltaan yhteisössä sitoudutaan. **Johan Bobacka** tarjoaa näkökulman analyttisen kemian kehityksestä keskitetyistä laboratoriomittauksista hajautettuihin analyyseihin ja kannettaviin, henkilökohtaisiin kemiallisiin sensoreihin. **Louis J. Muglia et al.** kirjoittavat spontaanin ennenaikaisen synnyttämisen ehkäisemisestä genomiikan näkökulmasta. **Markku Yli-Hallan** artikkeli käsittelee anaerobisissa olosuhteissa syntyvän happaman sulfaattipitoisen maaperän aiheuttamia haasteita erityisesti vesiympäristölle.

Antoisia lukuhetkiä! ■

Pääsihteeriltä*Pekka Aula*

Monitieteistä tutkimusta näkyväksi

Tieteelliset julkaisusarjat ovat aina olleet tiedeakatemioiden keskeistä toimintaa. Tyypillisesti julkaisut ovat esitelleet jäsenten tutkimustuloksia. Tämä jo 1600-luvulta alkanut perinne on myös osa Suomalaisen Tiedeakatemian perimää. Julkaisutoiminta käynnistettiin Tiedeakatemian perustamiskokouksessa 1908, jolloin päätettiin perustaa kaksi julkaisusarjaa yhteisnimekseen *Annales Academiae Scientiarum Fennicae*. Sarja koostui matemaattis-luonnontieteellisestä A-sarjasta ja humanistisesta B-sarjasta. Tiedeakatemia perusti myös Folklore Fellows' Communications -julkaisusarjan. Siitä tuli nopeasti johtava kansainvälinen kansanrunouden tutkijoiden julkaisu.

Tiedeakatemia on julkaisurikas. Alkuvuosikymmeninä ylös nostettuja ja ajansaotossa hiipuneita sarjanimikkeitä ovat Documenta Historica, Mathematica-Physica, Physica, Chemica, Geologica-Geographica, Biologica ja Medica-Anthropologica. Tiedeakatemia on myös osallistunut toisaalla julkaistavien sarjojen syntyyn. Yhdessä muiden, kuten Suomen Tiedeseuran, kanssa 1970-luvulla perustettuja ja edelleen toimivia nimikkeitä ovat Acta Botanica Fennica, Acta Zoologica Fennica, Annales Botanici Fennici ja Annales Zoologici Fennici.

Tiedeakatemia teki 1990-luvulla ison julkaisu-uudistuksen. Valtaosa silloisista nimikkeistä päätettiin lakkauttaa. Jäljelle jäivät Annales Academiae Scientiarum Fennicae Mathematica ja sen alasarja Mathematica Dissertationes, Folklore Fellows' Communications sekä humanistinen B-sarja, jonka nimi muutettiin Humanioraksi. Geologica-Geographica jatkoi vuoteen 2011 asti.

Viimeisin järjestely tehtiin viime vuosikymmenen vaihteessa. Mathematica ja Mathematica Dissertationes siirtyivät Suomen matemaattiselle yhdistykselle ja Folklore Fellows' Communications Kalevalaseurasäätiölle. Humanioran tie päättyi. Tiedeakatemialle jäi vuonna 2008 perustettu Kannanottoja-sarja ja läpi vuosikymmenten julkaistu Vuosikirja. Uudistuksessa päätettiin aloittaa uusi tieteellinen julkaisusarja. Nimi otettiin Suomalaisen Tiedeakatemia ensimmäisestä sarjasta. Uuden sarjan ensimmäinen numero on nyt käsissäsi: Annales Academiae Scientiarum Fennicae.

Uudesti syntynyt ”Tiedeakatemia Annaali”, kuten ensimmäistä vuoden 1908 sarjaa kutsuttiin, toteuttaa tiedeakatemioiden perustehtävää: mielenkiintoisten, korkeatasoisten tutkimusten esittelyä. Annales on vertaisarvoitu, monitieteinen ja monikielinen. Se tullaan julkaisemaan pääosin niin sanottuna näköispainoksena verkossa, aluksi kaksi numeroa vuodessa. Julkaisu tulee saamaan rinnalleen digitaalisen, julkaisutavaltaan ja sisällöltään monimuotoisen, työnimellä AASF+ kulkevan version. AASF+ mahdollistaa perinteistä julkaisurytmiä nopeamman sisällön julkaisemisen esimerkiksi keskusteluina tai blogina. Se myös laajentaa lehden lukijakuntaa. Ajankohtainen tiede- ja tutkimusorientoitunut reagointi maailman tapahtumiin tullee osaksi AASF+ -sisältöjä.

Annales Academiae Scientiarum Fennicae on osa Suomalaisen Tiedeakatemia pyrkimyksiä rakentaa yhteisöllisyyttä, tukea monitieteisyyttä ja edistää tieteen vaikuttavuutta. Annales on vahva panoksemme Suomessa harjoitettavan tieteen näkyväksi tekemiseen ja yhteiskunnalliseen keskusteluun. ■



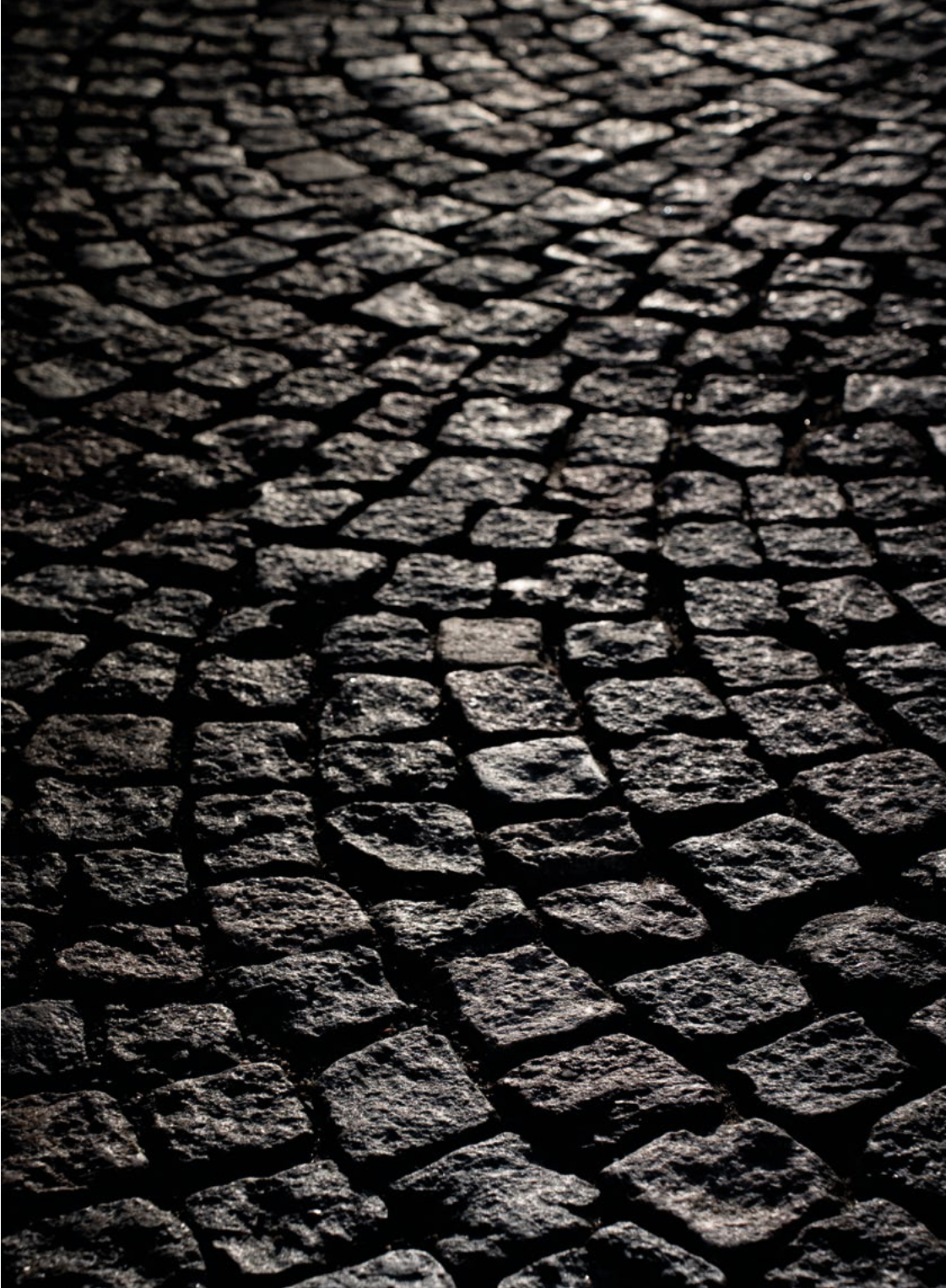
#1

Economic Degrowth and the Collapse of Institutional Order: Theory and Propositions

Juha-Antti Lamberg

Nooa Nykänen

Jarmo Taskinen



Abstract

Integrating insights from new institutional economics and studies on the collapse of past empires, we sketch a process model that links economic degrowth to the collapse of institutional orders. Our thought experiment starts from emphasizing the importance of institutions and enforcement mechanisms in maintaining a sufficient level of economic activity to sustain public costs. We flip this established logic and elucidate the negative role of economic degrowth in the weakening of the public sector's ability to enforce institutional rules. Internal and external shocks further shake the stability of the institutional order and, at some point, individuals' belief in institutional rules and norms weakens, resulting in system-wide collapse of the institutional order. We use historical literature on the collapse of Roman Empire as an "experimental prototype" (Meyer, Gaba, & Colwell, 2005: 471) to inspire and illustrate our thought experiment.

1. Introduction

Previous studies in institutional economics (e.g., Acemoglu, Johnson & Robinson, 2005) and economic history (Broadberry & Wallis, 2017; Persson & Sharp, 2015) have highlighted the efficiency of institutional order – the interplay of transparent and predictable formal and informal rules and enforcement mechanisms resolving disputes (North, 1990) – as a necessary condition for long-term economic growth (Acemoglu & Robinson, 2012). We turn this perspective upside down and suggest that the functioning of institutional orders might be reciprocally conditioned by economic growth. Accordingly, economic degrowth (cf., Kallis et. al., 2018) – defined as a long-term economic downturn – may be an existential crisis for the maintenance of institutional orders.

The collapse of institutional orders is far less studied than is the link between institutions and economic growth. The topic is indirectly touched upon in studies on collapses of political systems (e.g., Yoffee & Cowgill, 1988, Tainter, 2008), which consistently report how at some point individuals and organizations stop believing in the value and utility of established rules and norms, the institutional order of societies.

Translated into the language of organization studies, accounts from the corpus of collapse studies reflect “...the erosion or discontinuity of an institutionalized organizational activity or practice” (Oliver, 1992: 563).

Earlier studies on the evolution of institutional orders (e.g., Hodgson, 2009;

North, 1990) and collapses of political systems have remained separate streams of research. Meyer, Gaba, and Colwell (2005: 456) have observed that “...researchers acknowledge fieldwide flux, emergence, convergence, and collapse, but sidestep direct investigations of the causes and dynamic processes, leaving these efforts to political scientists and institutional economists.” In this spirit and inspired by other similar approaches to organizational theorizing (e.g., Clemente, Durand, & Roulet, 2017), our motivation is to integrate these streams of research and study the collapse process of institutional order.

Existing studies and conceptual papers on the erosion of institutional orders mainly focus on micro-level practices

The collapse of institutional orders is far less studied than is the link between institutions and economic growth.

(Maguire & Hardy, 2009; Ahmadjian & Robinson, 2001) and organizational forms (Davis, Diekmann, & Tinsley, 1994) as research objects (i.e., as something that decays without being simply replaced with an alternative institutional order). Scholars oriented to new institutional economics

(Bjørnskov & Foss, 2016) and new institutionalism (Ingram & Silverman, 2000) share similar research interests while working with a different conceptual vocabulary and often focusing on more macro-level institutional change. Nobel laureate Douglass C. North (1990), for example, worked with a theoretical model in which the emergence and erosion of institutions are equally possible depending on the strength of enforcement mechanisms and the prices of transactions. More rarely, as in Ahmadjian and Robinson (2001) and Allen and Heldring (2022), economic and institutional pressures are analyzed as dynamic interactions within a political system – a logic we follow in this essay.

Building on collapse studies and assumptions from theoretical work on institutional change, we set out propositions to outline the negative effect of economic degrowth on the public sector's ability to enforce institutional rules, which can result in the potential rise of private ordering as a substitute for state-centered institutional order. We integrate these effects into a theoretical model that explicates the mutual roles of institutional orders and the availability of economic resources. In particular, the model expands current understanding by identifying the mechanisms and processes preceding the collapse of institutional orders.

Our model may be used for simulations and counterfactual modelling, thus becoming a starting point for an improved understanding of the relationship between economic growth and the development and maintenance of institutional order, and the possibilities for management interventions to prevent chaotic transformations and collapses.

2. Collapse in the Prior Literature

We follow Yoffee and Cowgill's (1988) conceptual definitions of collapse. Though our focus is on the collapse of institutional orders, it is important to distinguish the other levels of analysis since they indirectly touch upon institutional orders as well: *civilizations*, *societies*, and *political systems*. First, civilizations are broad entities (e.g., modern Western democracies) that consist of multiple human societies linked through economic and social interactions. These entities are geographically delimited and may retain distinctive institutional systems. Overall, collapses of civilizations that indicate a sudden or rapid disappearance of distinct cultural entities are scarce. Second, societies (e.g., nation-states) are homogenous ethnic groups or entities organized under one political, economic, and institutional system. A breakdown of society, often understood as a classic case of collapse, is not synonymous with a collapse of civilization since the cultural traditions of civilization are not customarily restricted to a single state and may be practiced in other societies within the sphere of influence (Frank & Gills, 1993). The third type of collapse is that of a *political system*, which is defined as an entity under a unified institutional order (e.g., the Roman Empire). This unified system may include multiple societies with distinct ethnic or linguistic nationalities that are institutionally and politically integrated by a centralized source of power. Collapses of political systems typically result in the creation of new, smaller political units that may preserve selected traditions and institutions from

the previous culture. Institutional order, accordingly, is a necessary condition for the preservation of political systems.

Several grand theories of collapse emerged in the 20th century (Spengler, 1918; Toynbee, 1939; Sorokin, 1957; Coulborn, 1966) to explain and predict the cultural decline of civilizations. After these pioneering works, scholars turned to social science and archaeological methodologies, a move that resulted in a dramatic increase in the empirical body of evidence on a wide range of collapsed empires (e.g., Eisenstadt, 1969; Cipolla, 1970; Yoffee & Cowgill, 1988). Subsequently, the scope of scholarship extended to include collapses of civilizations and political systems. Alongside the decline of the Roman Empire, the collapse of the Mayan Empire between 600 and 1100 (Thompson, 1954; Culbert, 1973; Webster, 2002), the evolution of ancient Greece (Ober, 2015), and recently, the collapse of civilization in the ninth century Mesopotamia (Allen & Heldring, 2022) are ancient examples of collapse processes at the level of a political system. Finally, some studies have focused specifically on collapses at the level of a single society, such as Easter Island (Van Tilburg, 1994; Brander & Taylor, 1998).

A fundamental question in the collapse literature has been whether the breakdown and fall of societal entities can be explained by identifiable causal factors or whether these are explainable only in more complex systemic terms. In some cases, mechanisms of decline can be clearly identified, as in cases of severe environmental degradation (Diamond, 2011; Ponting, 2007) or changes in climatic conditions (Yu et al., 2000; Wang et al., 2005). These mechanisms may trigger or exacerbate more complex dynamics in

social instability and disintegration that in turn contribute to collapse-related processes. This has led scholars to study the dynamics of collapse by using mathematical and economic models and to evaluate the importance of proximal and peripheral conditions of decline (Turchin, 2003; Motesharrei et al., 2014), illuminating specifically into those cases of collapse that lack historical data or seem to derive from a variety of sources (Tainter, 1988; Turchin, 2003). However, formal models that focus on the interaction of variables related to economic production and distribution (e.g., tax rate, productivity, level of technology) are limited in their ability to explain cultural or institutional reactions that arise from the actors' attempts to solve problems related to changing economic pressures (e.g., Ahmadijan & Robinson, 2001).

We argue that there are at least two key reasons why a further integration of institutional and economic dimensions can advance the study of collapses of political systems. First, the interplay of social innovations and incentives of different societal groups plays a key role in state formation processes (North, Wallis & Weingast, 2009; Benati & Guerriero, 2020), in processes that *establish* stable societal conditions in the first place. Although certain economic conditions may represent a necessary condition in the functioning of political systems, they are not sufficient for maintaining and preserving the stability of political systems. Hence, institutional dynamics are important for understanding collapse processes from the perspectives of system (in)stability and (in)efficiency. Second, the insights from transaction cost economics (Williamson, 1985) strongly suggests that institutional

orders evolve in connection with actor evaluations of their performance: at the level of individual transactions, a belief in the functionality of an institutional order becomes a psychological and sociological question. In particular, dysfunction in the institutional conditions for transactions can lead to the erosion or rejection of established forms of transactions, which can have substantial effects across the system (Hodgson, 2009). For example, when North (1990) and Greif (2003) characterize private ordering – enforcement and dispute resolution by private actors – as characteristic to underdeveloped institutional orders, the collapse studies indirectly refer to an alternative trajectory in which societies *regress* to private ordering in which “...action moves from the level of the polity to that of groups... or bilateral traders as they attempt to perfect their trading relations in a self-help way” (Williamson, 2002: 438). In aggregate, these dynamics are relevant for the study of collapse processes, since they extend understanding of how and why economic pressures may trigger threshold responses that threaten the stable and predictable functioning of institutional orders.

3. Why Institutional Orders Collapse

We focus on the collapse of institutional order as a process that erodes both the maintenance credibility of public authorities and the predictability of institutions from the perspective of economic actors making decisions on transactions. By the collapse of institutional order, we accord-

ingly refer to system-level transformation processes that result in a radical reduction in the degree of institutional stratification.

Our theorizing builds on core ideas in new institutional economics (e.g., Libecap, 1997; Hodgson, 2009; Wallis, 2016) that focus on radical, long-term transformations of institutional orders from less stratified and custom based to highly organized and extensively stratified. Pioneering work by North (1990) and more recent advances in institutional theory (e.g., Allen, 2011; Williamson, 2000; Allen & Heldring, 2022) guide us in seeking rationalized explanations of economic behavior. These behaviors (e.g., decisions concerning transactions) are determined partly by higher order contractual arrangements and formal and informal institutions (North, 1990). However, these same behaviors can also be the engine of institutional change. Accordingly, seeing collapse from the perspective of the decision-making processes at the level of transactions requires us to focus on both the economic context in which the actors are embedded and the functionality of the broader institutional and contractual system (May, Rayter & Ledgerwood, 2016). In the following section, we discuss how institutional maintenance mechanisms may take a reverse role, contributing to an emerging downward cycle (cf. Benati & Guerriero, 2020). Figure 1 synthesizes our theoretical model.

Assumption 1: Economic growth and national wealth is a necessary condition for the building and maintenance of institutional systems. Likewise, economic degrowth makes institutional systems increasingly vulnerable the longer it continues.

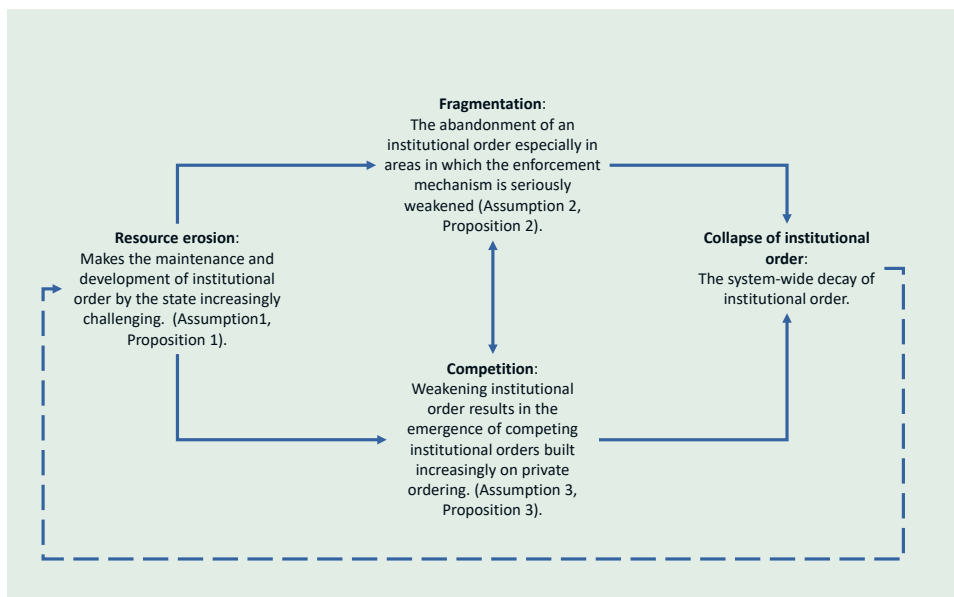


Figure 1: The Collapse of Institutional Order. Straight line=1st order causal effect; Dashed line=2nd order indirect effect.

The first element in our theorizing emphasizes the resource base of institutional systems. All institutional orders face resource constraints that are hard to manage, especially without technological advances (Goldstone, 2002). Historical research on past collapses (e.g., Tainter, 1988; Allen & Heldring, 2022) emphasizes the limitations in carrying capacity of agricultural production and the consequent pressures on population growth. The premise in pre-industrial societies, for example, would be that population size affects the number and magnitude of economic transactions as well as the availability and price of labor. Earlier in history, the role of population was essential, as the productivity and the size of markets were functions of population size in the pre-industrial era (Goldstone, 2002). For modern economies, the role of population growth is more ambiguous

because of the increased role of technology in facilitating transactions and the link between overpopulation and environmental problems. Yet when generalized as resource generation and a source of economic transactions, we continue to lack evidence of economies growing without concurrent population growth and likewise, no large-scale evidence on stratified institutional systems without long-term economic growth. For the building our process model, economic growth, or the lack of it, appears as a fundamental assumption.

Assumption 2: Transparent and predictable institutions are a necessary condition for an efficient system of transactions. Likewise, the absence of such institutions potentially reduces the number of more complex, contract-based transactions.

The second important notion from the literature is the necessity of predictable and functioning institutions (e.g., Langlois, 1986; Allen, 2011). Institutions are needed because each economic transaction is a risk. Safeguarding against these risks is costly for the reasons explicated in the research on transaction cost economics (Williamson, 1991), concerning especially the costs of monitoring and searching. The role of institutions – formal and informal – is to create a transparent and predictable framework that helps to lower transaction costs and subsequently increase the number and volume of transactions. In other words, large-scale economies without a sufficient institutional framework would logically fail or at least the lack of such a framework would prevent economic growth (e.g., Acemoglu, Johnson, & Robinson, 2005). The literature also demonstrates the evolutionary nature of institutions: institutional systems emerge and develop as a function of power positions and interests in a society (North, Wallis, & Weingast, 2009). These same dynamics may render the system obsolete, resulting in the erosion and demise of institutional orders (cf. Argyres & Liebeskind, 1999). Institutionalists also emphasize the role of external system shocks (e.g., Mantzavinos, North, & Shariq, 2004; Robertson & Langlois, 1994) as important mechanisms in the transformation of institutional orders. Individual events and external shocks may disrupt institutional stability and loosen the contextual constraints for diverging development paths (Soifer, 2012). Critical events may also challenge the legitimacy of existing institutional orders and thus launch change processes in institutional and organizational fields (Hardy & Maguire

2010; Clemente, Durand & Roulet, 2017).

Assumption 3: A sufficiently strong public sector is a necessary condition for the development and enforcement of institutions. Likewise, a relative weakening of the public sector results in the rise of private ordering when repeated over time.

The theoretical literature emphasizes the importance of enforcement mechanisms, third-party monitoring and securing contacts between economic actors. The enforcement role typically belongs to governments and other public sector organizations (North, 1990; Greif, Milgrom, & Weingast, 1994) and to private organizations, even voluntary communities (Leeson, 2007) based on private ordering (Greif, 2003). Hodgson (2009: 160) addresses the mutually reinforcing roles of public and private ordering and the fundamental role of state in the evolution of institutional orders: “...law is neither entirely spontaneous nor reducible to custom, and the constitutive role of the state in legal systems has once again to be acknowledged”. If the private ordering is the primary dispute resolution mechanism, the economic transactions presumably are smaller, local and, as indicated by transaction cost theory (Williamson, 1975), controlled by private actors such as clans or guilds (Kieser, 1989). Accordingly, dramatic transformations of power structure necessarily challenge the resilience and functionality of enforcement mechanisms. Overall, any large-scale transactional system requires a public sector, a state, to design and maintain institutional order ultimately by judging disputes.

4. How Institutional Orders Decay

The theoretical assumptions above summarize some of the key assumptions in the new institutional economics and are as such an answer for *why* institutional orders collapse. However, earlier research does not say much about *how* an institutional order transforms from a relative state of equilibrium to disequilibrium, meaning a subsequent transformation from public sector enforcement to increasing importance of private ordering. To approach a more nuanced processual understanding of the collapse process, we use the literature concerning Rome in late antiquity as an example of the long-term collapse of a stratified institutional order.¹ Despite scattered evidence, the latest empirical research (Scheidel, Morris, & Saller, 2007; Ward-Perkins, 2005) establishes a clear overall picture on the fall of the Western Roman Empire. In AD 250, the Roman Empire was prosperous and had a complex economic and political system based on large-scale trade, specialized production (Temin, 2001; Geraghty, 2007), and a relatively stable institutional framework and enforcement system (North, 1990). After the overthrow of the last emperor in AD 476 and before the re-emergence of large-scale European commerce, the western regions of the former Roman Empire lost population, commerce became marginalized and localized, engineering

skills deteriorated, and institutional order was shattered (Ward-Perkins, 2005). Although there were dramatic regional differences in the severity of the downturn (McCormick, 2001; Demandt, 2007) and the following centuries included some better periods, the picture that emerges is of the near destruction and rebuilding of a unified institutional order in the western parts of the Empire.

Our reading of the collapse of the Roman institutional order emphasizes the erosion of institutional enforcement mechanisms. Accordingly, the collapse of the Roman Empire looks like a thorough dissolution of formalized and state-instigated institutions (Hodgson, 2009) that metamorphosed into private ordering enforced by different usurping institutional groupings (clans) that began to provide rules for economic and social organization at the level of local communities (see Eisenstadt, 1969; Williamson, 2000).

An illustrative reading of Rome's history elucidates three processual characteristics resulting in the collapse of institutional order.

Proposition 1a: Extended periods of economic degrowth result in resource erosion, which subsequently makes the maintenance and development of institutional order by the state increasingly challenging.

The process of *resource erosion* describes the joint effect of population decline and the decrease in market transactions embedded in a context characterized by extended periods of economic degrowth and periodically exacerbated by exogenous shocks, such as military conflicts and widespread plagues (e.g., Ward-Perkins, 2005). Resource

¹ The history of Rome is an archetypical analogy that has been used for different types of theoretical purposes. In management and organization studies, Rueff & Harness (2009) and Carmeli & Markman (2011) are recent examples of such uses and interest.

erosion resulted in a declining and ultimately insufficient capacity to maintain institutional order, which then reflected in the decline of economic activity in various ways. As Bang (2007: 52-53) summarizes, “[...] the provincial magnates of old stock and new “barbarian conquerors” found it impossible to maintain extraction at the previous level and sophistication. Their capacity for concentrating and mobilizing agricultural surplus resources was much more circumscribed, and their monopoly powers in “selling” protection were seriously weakened”.

The whole western part of the Roman Empire increasingly “...was not equal to the task of administering the whole Empire...” (Clark, Collingwood, & Myres, 1956: 275), especially on the periphery. Accordingly, the declining volume of trade and population and the resulting difficulties in maintaining and developing the enforcement mechanism jointly resulted in difficulties keeping the institutional order integrated.

Proposition 1b: If economic actors estimate that future long-term commitment to the established institutional order will increase the risk of transacting over accepted limits, they are prone to resort to private ordering, resulting in the fragmentation of institutional orders.

Proposition 1c: If economic actors estimate that future long-term commitment to the established institutional order will be an economically inferior option compared to alternative institutional orders, they will switch their transaction context, resulting in competition between institutional orders.

Resource erosion leads economic actors to re-evaluate the utility of the institutional order in the prevention of

contractual hazards. Hence, resource erosion can trigger processes of fragmentation and competition via the following mechanisms.

Proposition 2: The abandonment of an institutional order especially in areas in which the enforcement mechanism is seriously weakened results in fragmentation and, subsequently, collapse.

The *process of fragmentation* refers to the joint effect of resource erosion and competition. Because of this process, the Roman Empire lost its hierarchical nature (Williamson, 1985), and the power was seized by local authorities, landlords, and war chieftains. In other words, the history of the Roman Empire illustrates a transformation from hierarchy as the dominant organizational design (Roberts & Greenwood, 1997) to clans (Ouchi, 1980). This regressive process was especially prevalent in the frontier provinces, such as Gaul and Britain, where civil wars had weakened defenses, causing migration to safer areas. Under these conditions, it was difficult to maintain tight imperial control over areas, and they eventually escaped from its direct control. The situation eventually evolved toward a patronage system and more independent power centers (e.g., Walbank, 1969). In parallel, self-sufficient manors and monasteries were increasingly less dependent on multilateral trade and accordingly did not need the Pax Romana anymore. Instead, the inert bureaucracy and heightened public costs became a burden for local – and often isolated – economic entities. As Heather (1995: 127) has noted, the loss of legitimacy of Imperial Rome and its administration occurred rapidly. :

...because of the appearance of new military forces, the Roman state was no

longer capable of sustaining local elites in this fashion (and hence of constraining their loyalties either), the whole point of attachment to the Empire disappeared. As a result, they naturally tended in such circumstances to look elsewhere for props to their position, notably to whichever barbarian immigrant group was currently most powerful in their own locality. In practice, such switches of loyalty could happen surprisingly quickly.

Proposition 3: Weakening institutional order results in the emergence of competing institutional orders built increasingly on private ordering. Likewise, economic actors with abundant resources may switch to already existing institutional orders perceived more predictable and cost efficient.

As a joint result of resource erosion and institutional fragmentation, the process of *competition* resulted in hundreds if not thousands of institutional systems and enforcement authorities instead of one or a few, such as in the case of usurper regimes. The Roman Empire's failure to fully integrate its territories into a single administrative whole is also an important issue (Hopkins, 1980: 101). In Britain, for example, the institutional setting was a mix of pre-Roman practices and norms and Roman rules and laws enforced by local authorities as well as Roman administration. The competition between institutional orders concerned not only geographic locations but also subgroups across the Empire. In particular, the rise of the Christian church and Christianity "... caused the status of citizenship to lose its meaning, which involved no consciousness of an obligation to maintain the Roman Empire against its enemies (and thus) the population lacked a strong sense of shared

interest" (Liebeschuetz, 2001: 133). Similarly, the overall decline of the population during turbulent times led to a rivalry between landlords, who needed labor, and the state, which suffered from a lack of recruits for its army. Accordingly, an important sub-process resulting in the transformation away from the larger and more centralized institutional order was the emergence and return of various smaller institutional orders often based on private ordering.

5. Discussion

The purpose of our essay has been to theorize and explicate the mechanisms and processes predicting collapses of institutional orders. The identified mechanisms corroborate and clarify theoretical assumptions from new institutional economics literature, illustrated with a stylized reading of the collapse of the Roman Empire.

For institutional scholars, our thought experiment offers complementary ideas to the existing historical knowledge on institutional evolution (e.g., Allen, 2011; Allen and Heldring, 2022; Greif, 2003; Ober, 2015) by offering a nuanced picture of the mechanisms and processes resulting in the collapse of institutional orders. Particularly, we highlight the fundamental importance of economic resources not only as the results of institutional framework (cf. Acemoglu, Johnson, & Robinson, 2005) but even more so as the antecedents of the legitimacy of this framework. According to our model, institutional orders which undergo extended periods of degrowth, whether intentionally (as assumed in the sustainability-oriented

degrowth literature, see Kallis et. al., 2018) or not, are susceptible to decline and collapse because of resource erosion and its negative effect on the enforcement capacity of the public sector. Even today, when the threat of environmental collapse under capitalism drives political decisions (Hoffman & Jennings, 2021), both system-based (Gills & Morgan, 2021) and management-oriented degrowth approaches (Banerjee et al., 2021) can only work if they can counter the inevitable processes of fragmentation and competition with institutionally legitimate alternatives, such as shared, non-economic value systems. Given the incentives for

private ordering and the institutional complexity of the global world system, however, this task remains far from simple. While turning into a reduced level of stratification may in some circumstances maximize economic value at the individual and organizational level or promote alternative societal goals, the overall effect may be fatal, as in the case of the Roman Empire. Our essay emphasizes the need to study collapse processes not only as being based on individual and organizational mechanisms but also as results of system-level evolutionary dynamics.

Kirjoittajat

Juha-Antti Lamberg

Juha-Antti Lamberg (Ph.D.) is a professor of strategy and economic history at the Jyväskylä School of Business and Economics. His research focuses on the history of strategy, industry evolution, especially in relation to the forest industry and grocery trade, as well as institutional economic history.

Nooa Nykänen

Nooa Nykänen (PhD) works as a postdoctoral researcher at the Department of Industrial Engineering and Management, Aalto University. His research interests include strategic decision-making processes, business history, and organizational adaptation to environmental and institutional change processes.

Jarmo Taskinen

Jarmo Taskinen works as a doctoral researcher at the University of Jyväskylä School of Economics. His research interests include business history, the internationalization of companies, career research in the industrial sector, and industry evolution of the paper and pulp industry.

References

- Acemoglu, D., Johnson, S., & Robinson, J. A. (2005). Institutions as a Fundamental Cause of Long-Run Growth. *Handbook of Economic Growth*, 1, 385-472.
-
- Acemoglu, D., & Robinson, J. A. (2012). *Why nations fail: The origins of power, prosperity and poverty*. New York: Crown Publishers.
-
- Ahmadjian, C. L., & Robinson, P. (2001). Safety in numbers: Downsizing and the deinstitutionalization of permanent employment in Japan. *Administrative Science Quarterly*, 46(4), 622-654.
-
- Allen, D. W. (2011). *The Institutional Revolution: Measurement and the Economic Emergence of the Modern World*. Chicago: University of Chicago Press.
-
- Allen, R. C., & Halding, L. (2022). The collapse of civilization in southern Mesopotamia. *Climatica*, 16(2), 369-404.
-
- Argyres, N. S., & Liebeskind, J. P. (1999). Contractual commitments, bargaining power, and governance inseparability: Incorporating history into transaction cost theory. *Academy of Management Review*, 24(1), 49-63.
-
- Banerjee, S. B., Jermier, J. M., Peredo, A. M., Perey, R., & Reichel, A. (2021). Theoretical perspectives on organizations and organizing in a post-growth era. *Organization*, 28(3), 337-357.
-
- Bang, P. F. (2007). Trade and empire: In search of organizing concepts for the Roman economy. *Past & Present*, 195, 3-54.
-
- Benati, G. & Guerriero, C. (2020). The origins of the state. Technology, cooperation and institutions. *Journal of Institutional Economics*, 1-15.
-
- Bjørnskov, C., & Foss, N. J. (2016). Institutions, entrepreneurship, and economic growth: what do we know and what do we still need to know? *Academy of Management Perspectives*, 30(3), 292-315.
-
- Broadberry, S., & Wallis, J. J. (2017). *Growing, shrinking, and long run economic performance: historical perspectives on economic development* (No. w23343). National Bureau of Economic Research.
-
- Brander J.A., & Taylor M.S. (1998). The simple economics of Easter Island: A Ricardo-Malthus model of renewable resource use. *American Economic Review*, 88(1), 119-138.
-
- Carmeli, A., & Markman, G. D. (2011). Capture, governance, and resilience: strategy implications from the history of Rome. *Strategic Management Journal*, 32(3), 322-341.
-
- Cipolla, C. (1970). *The Economic Decline of Empires*. London: Methuen.
-
- Clark, G. N., Collingwood, R. G., & Myres, J. N. L. (1956). *The Oxford history of England: 1, Roman Britain and the English settlements* (2nd ed. repr.). London.
-
- Clemente, M., Durand, R., & Roulet, T. (2017) The recursive nature of institutional change: An Annales School perspective. *Journal of Management Inquiry*, 26(1), 17-31.
-
- Coulborn, R. (1966). Structure and Process in the Rise and Fall of Civilized Society. *Comparative Studies in Society and History*, 8, 404-431.
-
- Culbert, P. T. (1973). *The Classic Maya Collapse*. Albuquerque: University of New Mexico Press.
-
- Davis, G. F., Diekmann, K. A., & Tinsley, C. H. (1994). The Decline and Fall of the Conglomerate Firm in the 1980s: The Deinstitutionalization of an Organizational Form. *American Sociological Review*, 59 (4), 547-570.
-
- Demandt, A. (2007). *Die Spätantike: Römische Geschichte von Diocletian bis Justinian, 284-565 n. Chr.* Köln: Verlag C.H. Beck.
-

- Diamond, J. (2011). *Collapse: how societies choose to fail or succeed: revised edition*. New York: Penguin.
- Eisenstadt, S. N. (1969). *The Political Systems of Empires: The Rise and Fall of the Historical Bureaucratic Societies*. New York: Free Press.
- Frank, A. G., & Gills, B. K. (Eds.). (1993). *The world system: five hundred years or five thousand?* London: Routledge.
- Geraghty, R. M. (2007). The impact of globalization in the Roman empire, 200 BC-AD 100. *Journal of Economic History*, 67 (4), 1036-1061.
- Gills, B., & Morgan, J. (2021). Economics and climate emergency. *Globalizations*, 18(7), 1071-1086.
- Goldstone, J. A. (2002). Efflorescences and Economic Growth in World History: Rethinking the 'Rise of the West' and the Industrial Revolution. *Journal of World History*, 13(2), 323-389.
- Greif, A. (2003). *Institutions: Theory and history*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Greif, A., Milgrom, P., & Weingast, B. R. (1994). Coordination, commitment, and enforcement: The case of the merchant guild. *Journal of Political Economy*, 102 (4), 745-776.
- Hardy, C., & Maguire, S. (2010). Discourse, field-configuring events, and change in organizations and institutional fields: Narratives of DDT and the Stockholm Convention. *Academy of Management Journal*, 53(6), 1365-1392.
- Heather, P. (1995). The Huns and the end of the Roman Empire in Western Europe. *The English Historical Review*, 110(435), 4-41.
- Hodgson, G. M. (2009). On the institutional foundations of law: the insufficiency of custom and private ordering. *Journal of Economic Issues*, 43(1), 143-166.
- Hoffman, A. J., & Jennings, P. D. (2021). Institutional-political scenarios for Anthropocene society. *Business & Society*, 60(1), 57-94.
- Hopkins, K. (1980). Taxes and trade in the Roman Empire (200 BC-AD 400). *The Journal of Roman Studies*, 70, 101-125.
- Ingram, P., & Silverman, B. S. (2000). Introduction: The new institutionalism in strategic management. In *The new institutionalism in strategic management* (pp. 1-30). Emerald Group Publishing Limited.
- Kallis, G., Kostakis, V., Lange, S., Muraca, B., Paulson, S., & Schmelzer, M. (2018). Research on Degrowth. *Annual Review of Environment and Resources*, 43, 291-316.
- Kieser, A. (1989). Organizational, institutional, and societal Evolution: Medieval craft guilds and the genesis of formal organizations. *Administrative Science Quarterly*, 34(4), 540-64.
- Langlois, R. N. 1986. Rationality, institutions, and explanation. In *Economics as a Process: Essays in the New Institutional Economics*. New York, Cambridge University Press; 225-55.
- Leeson, P. T. (2007). An-arrgh-chy: The Law and Economics of Pirate Organization. *Journal of Political Economy*, 115(6), 1049-1094.
- Libecap, G. (1997). The New Institutional Economics and Economic History. *The Journal of Economic History*, 57(3), 718-721. doi:10.1017/S0022050700019112
- Liebeschuetz, J. H. W. G. (2001). Late Antiquity and the concept of decline. *Nottingham Medieval Studies*, 45, 1-11.
- Mantzavinos, C., North, D.C., & Shariq S. (2004). Learning, institutions, and economic performance. *Perspectives on Politics* 2 (01), 75-84.
- Maguire, S., & Hardy, C. (2009). Discourse and deinstitutionalization: The decline of DDT. *Academy of Management Journal*, 52(1), 148-178.

- May, R. C., Rayter, G. R., & Ledgerwood, D. E. (2016). Institutional Erosion and Its Effects on Russia's Corporate Leadership. *Journal of Leadership & Organizational Studies*, 23(2), 191-207. doi:10.1177/1548051816636622
- McCormick, M. (2001). *Origins of the European economy: communications and commerce AD 300-900*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Meyer, A. D., Gaba, V., & Colwell, K. A. (2005). Organizing far from equilibrium: Nonlinear change in organizational fields. *Organization Science*, 16(5), 456-473.
- Motesharrei, S., Rivas, J., & Kalnay, E. (2014). Human and nature dynamics (HANDY): Modeling inequality and use of resources in the collapse or sustainability of societies. *Ecological Economics*, 101, 90-102.
- North, D. C. (1990). *Institutions, Institutional Change and Economic Performance*. Cambridge: Cambridge University Press.
- North, D. C., Wallis, J.J., & Weingast, B.R. (2009). *Violence and Social Orders: A Conceptual Framework for Interpreting Recorded Human History*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ober, J. (2015). *The rise and fall of classical Greece*. Princeton University Press: New Jersey.
- Oliver, C. (1992). The Antecedents of Deinstitutionalization. *Organization Studies*, 13(4), 563-588. doi:10.1177/017084069201300403
- Ouchi, W. G. (1980). Markets, bureaucracies, and clans. *Administrative Science Quarterly*, 25(1), 129-141
- Persson, K. G., & Sharp, P. (2015). *An Economic History of Europe*. Cambridge University Press.
- Ponting, C. (2007). *A New Green History of the World: The Environment and the Collapse of the Great Civilization*. New York: Penguin Books.
- Robertson, P. L., & Langlois, R. (1994). Institutions, Inertia and Changing Industrial Leadership. *Industrial and Corporate Change*, 3(2), 359-378.
- Roberts, P. W., & Greenwood, R. (1997). Integrating transaction cost and institutional theories: Toward a constrained-efficiency framework for understanding organizational design adoption. *Academy of Management Review*, 22(2), 346-373.
- Ruef, M., & Harness, A. (2009). Agrarian origins of management ideology: The Roman and Antebellum cases. *Organization Studies*, 30(6), 589-607.
- Scheidel, W., Morris, I., & Saller, R. (ed.) (2007). *The Cambridge Economic History of the Greco-Roman World*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Soifer, H. D., (2012) The causal logic of critical junctures. *Comparative Political Studies*, 45(12), 1572-1597.
- Sorokin, P. (1957). *Social and cultural dynamics*. Boston: Porter Sargent.
- Spengler, O. (1918). *The decline of the West*. New York: Alfred Knopf.
- Tainter, J. (1988). *The collapse of complex societies*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Temin, P. (2001). A Market Economy in the Early Roman Empire. *The Journal of Roman Studies*, 91, 169-181. doi:10.2307/3184775
- Thompson, J. E. S. (1954). *The rise and fall of Maya Civilization*. Norman: University of Oklahoma Press.
- Toynbee, A. (1933-1954). *A Study of History*. Oxford: Oxford University Press
- Turchin, P. (2003). *Historical dynamics: Why States Rise and Fall?* Princeton Studies in Complexity, Princeton, New Jersey.

Van Tilburg, J. A. (1994). *Easter Island: Archaeology, Ecology & Culture*. Washington DC: Smithsonian Institution Press.

Walbank, F. W. (1969). *The Awful Revolution: The Decline of the Roman Empire in the West*. Liverpool: Liverpool University Press.

Wallis, J. (2016). The New Economic History and Beyond: The Scholarship of Douglass C. North. *The Journal of Economic History*, 76(3), 937-947. doi:10.1017/S0022050716000851

Wang, S. W. (2005). Abrupt climate change and collapse of ancient civilizations at 2200BC-2000BC, *Progress in Natural Science-Materials International*, 15(10), 908-904.

Ward-Perkins, B. (2005). *The fall of Rome: And the end of civilization*. Oxford: Oxford University Press.

Webster, D. (2002). *The Fall of the Ancient Maya*. New York: Thames and Hudson

Williamson, O. E. (1975). *Markets and hierarchies: Analysis and antitrust implications: a study in the economics of internal organization*. New York: Free Press.

Williamson, O. E. (1985). *The economic institutions of capitalism: Firms, markets, relational contracting*. New York: Free Press.

Williamson, O. E. (1991). Strategizing, economizing, and economic organization. *Strategic Management Journal* 12(3): 75-94.

Williamson, O. E. (2000). The new institutional economics: taking stock, looking ahead. *Journal of Economic Literature* 38(3): 595-613.

Williamson, O. E. (2002). The lens of contract: private ordering. *American Economic Review*, 92(2), 438-443.

Yoffee, N. (1988). Introduction. In Yoffee, N. & Cowgill, G. L. (ed.) *The collapse of ancient states and civilizations*. University of Arizona Press, 1-20.

Yu, S. Y., Zhu, C., Song, J., et al. (2000). Role of climate in the rise and fall of Neolithic cultures on the Yangtze Delta. *BOREAS*, 29(2), 157-165.



#2

Femtometreistä valovuosiin: neutroni- tähdet eksootti- sen aineen laboratoriona

Aleksi Vuorinen



Abstract

The Standard Model of particle physics describes the basic properties and interactions of all known elementary particles at an astonishingly good level, and predictions derived from it have time and again been experimentally verified. One of its parts, namely the theory of the strong nuclear interaction, Quantum Chromodynamics (QCD), has however proven to be computationally extremely demanding. In particular, the properties of matter described by QCD are at the moment still largely unknown in the limit of high baryon density.

Very recently, the study of dense QCD matter has taken important steps forward owing largely to new observational data originating from a distant but very effective laboratory: neutron stars. The cores of these extremely compact stars contain the densest form of matter in our present-day Universe, and the properties of this matter are reflected on the measurable macroscopic properties of the stars themselves. In this review article, I will introduce this active field of research, placing particular emphasis on recent efforts to discover an entirely new phase of matter - cold and dense quark matter - inside the cores of the most massive neutron stars.

1. Johdanto

Mitä tavalliselle atomeista koostuvalle aineelle tapahtuu kun sitä puristetaan kasaan rajatta? Tähän kenties hieman lapselliseltakin kuulostavaan kysymykseen vastaaminen on yllättävän vaikeaa ja pitää sisällään hämmästyttävän paljon monimutkaista ja osittain hämärän peitossakin olevaa fysiikkaa. Se nivoo myös yhteen useita melko kaukaisiakin fysiikan aloja aina hiukkasfysiikasta yleisen suhteellisuusteorian kautta havainnoivaan astrofysiikkaan.

Tässä yleistajuisessa artikkelissa tarkastelen yllä esitettyä kysymystä kahdesta lähes vastakkaisesta näkökulmasta: yhtäällä teoreettisen hiukkasfysiikan ja toisaalta neutronitähkien tutkimuksen kannalta. Yhteinen kosketuspinta näille syntyy siitä, että kaikkein tiheintä ainetta sisältävät fysikaaliset systeemit löytyvät nimenomaan neutronitähkien ytimistä. Tähtien ja niiden sisältämän aineen ominaisuuksien ymmärtäminen on puolestaan mahdollista vain ydin- ja hiukkasfysiikan koneiston kautta – sisältäväthän nämä ytimet nimenomaan tiheää ydin- ja alkeishiukkasainetta.

Käsillä olevan artikkelin yleisrakenne on seuraava: lyhyen johdannon jälkeen siirryn luvussa 2 tarkastelemaan kvanttiväridynamiikan (QCD) teoriaa osana hiukkasfysiikan Standardimallia. Lyhyen peruskatsauksen jälkeen keskityn erityisesti teorian ns. faasirakenteen kuvailuun, eli siihen, millaisia aineen olomuotoja eri lämpötilan ja tiheyden arvoilla odotetaan löytyvän. Tätä seuraa luvussa 3 katsaus neutronitähkien fysiikkaan, missä etenen lyhyen historiallisen kertauksen jälkeen neutronitähkien tärkeimpiin mitattaviin

ominaisuuksiin. Luku 4 nivoo lopulta nämä kaksi aihepiiriä yhteen ja johdatelee kysymään, miten neutronitähkihavainnot ja teoreettisen ydin- ja hiukkasfysiikan tulokset pystytään yhdistämään neutronitähhtiaineen tutkimuksessa. Tämän jälkeen tarkastelen luvussa 5 hyvin tuoreita tutkimustuloksia, joiden perimmäisenä tavoitteena on selvittää, löytyykö neutronitähkien ytimistä kokonaan uudentyypinen aineen olomuoto, kylmä kvarkkiaine. Luvussa 6 luon vielä viimeisen lyhyen yleiskatsauksen koko artikkelin aihepiiriin pyrkien nivomaan siinä käsitellyt asiat yhteen.

2. Kvanttiväridynamiikan perusteita

Hiukkasfysiikan tieteenala tutkii nimensä mukaisesti sitä, mistä kaikki ympärilämme oleva aine koostuu kaikkein pienimmillä pituuskaaloilla, ja miten nämä luonnon pienimmät rakenneosat – alkeishiukkaset – vuorovaikuttavat keskenään. Käytännössä kaikki tämänhetkinen ymmärrys hiukkasfysiikasta on sisällytetty ns. hiukkasfysiikan Standardimalliin [ks. esim. (Schwartz, 2013)], jonka on kerta toisensa jälkeen nähty kuvaavan oikein kolmea tunnettua alkeisvuorovaikutusta: sähkömagneettista voimaa sekä heikkoa ja vahvaa ydinvoimaa. Näistä kaksi ensimmäistä kuvaavat suuruudeltaan siinä mielessä heikkoja voimia, että niitä voidaan menestyksellisesti kuvata käyttäen ns. häiriöteoreettista koneistoa, jonka puitteissa erilaiset fysikaaliset suuret kehitetään vuorovaikutuksen voimakkuutta kuvaavan kytkinvakion (QED:ssa

alkeisvaraus) potenssisarjoiksi. Näiden vuorovaikutusten osalta Standardimallin voidaankin hyvällä syyllä sanoa olevan pitkälti ratkaistu. Viimeisen eli vahvan ydinvoiman ja sitä kuvaavan QCD-teorian tapauksessa näin ei kuitenkaan ole johtuen siitä, että on nimensä mukaisesti erittäin vahva. Montaa sen piiriin kuuluvaa ja fenomenologian kannalta tärkeääkin ilmiötä ei vielä osata kuvata riittävän tarkasti (Brambilla et al., 2014).

Samalla tavoin kuin kvanttielektrodynamiikka eli QED kuvaa sähkömagneettista voimaa fotonien vaihtona sähköisesti varattujen hiukkasten välillä, QCD kuvaa vahvaa ydinvoimaa gluonien vaihtona ns. värivarauksen omaavien alkeishiukkasten, kvarkkien, välillä. Gluonien ja fotonien – ja samalla QCD:n ja QED:n – merkittävin ero löytyy siitä, että ensinmainitut kentät ovat itsekin värivarattuja, eli gluonit vuorovaikuttavat myös itsensä kanssa.

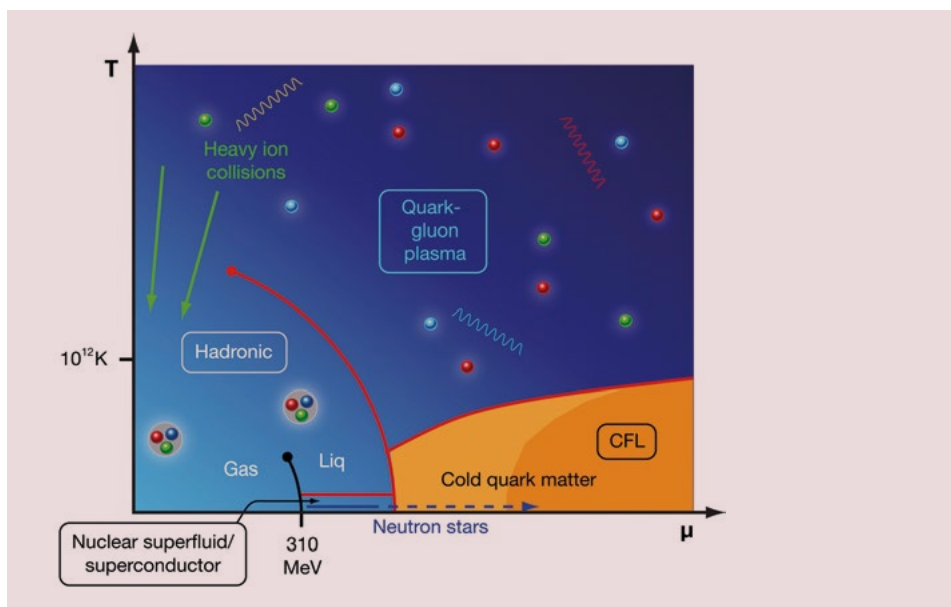
Mitä tavalliselle atomeista koostuvalle aineelle tapahtuu kun sitä puristetaan kasaan rajatta?

Lisäksi QCD:ssa vuorovaikutuksen voimakkuus on valtavasti sähkömagneettista voimaa suurempi ja lisääntyy hiukkasten etäisyyden kasvaessa. Tämä selittää yhden QCD:n merkittävimmistä ominai-

suuksista, värivankeuden: miksi kvarkkeja ja gluoneja ei normaalioloissa esiinny vapaina hiukkasina vaan ainoastaan värineutraalien hadronien – kuten protonien ja neutronien – sisään vangittuina.

Toinen QCD:n aivan perustavanlaatuisimmista ominaisuuksista on nimeltään asymptoottinen vapaus. Se tarkoittaa vahvan ydinvoiman heikkenemistä suurten energioiden – tässä tapauksessa kenttien välillä vaihtuvan liikemäärän – rajalla ja johtaa hyvin mielenkiintoiseen ennusteseen QCD:n kuvaaman aineen käytökselle korkean energiatihedden rajalla. Riittävän korkeilla lämpötilan ja hiukkastiheyden arvoilla QCD-aine nimittäin siirtyy hadronien muodostamasta kaasu- tai nestemäisestä faasista värivankeudesta vapautuneiden kvarkkien ja gluonien nestemäiseen olomuotoon. Tätä ilmiötä kutsutaan englanninkielisellä termillä deconfinement, ja korkeissa lämpötiloissa tätä kvarkkigluoniplasmaksi kutsuttua ainetta on pystytty tuottamaan hiukkaskiihdyttimissä suoritetuissa ns. raskasione-kokeissa. Korkeiden tiheyksien ja matalien lämpötilojen rajalla tätä vastaavan kvarkki-aineen tuottaminen laboratoriokokeissa ei kuitenkaan ole mahdollista. Tällaista ainetta onkin olemassa korkeintaan yhdessä paikassa koko maailmankaikkeudessa: neutronitähtien ytimissä.

QCD-aineen faasidiagramma, joka esittää sen eri olomuodot lämpötilan ja kvarkkien kemiallisen potentiaalin μ (käytännössä kvarkkien tiheyden) funktiona, on esitetty kuvassa 1. Värivankeutta vastaava hadroninen faasi löytyy sen vasemmasta alakulmasta, ja isoon väritettyyn pisteeseen päättyvä punainen kaariviiva edustaa mahdollista ensimmäisen kertaluvun deconfinement-transitiota eli faasimuutosta hadroneja ja vapaita



Kuva 1. QCD:n faasidiagramma. Lähde: Alan Stonebraker, <https://physics.aps.org/articles/v3/44>.

kvarkkeja sisältävien olomuotojen välillä. Korkeilla lämpötiloilla ja suhteellisen pienillä tiheyksillä transiatio on jatkuva, mistä johtuu viivan katkeaminen kriittiseen pisteeseen. Tämän pisteen ja siitä lähtevän transiatioviivan olemassaolo on kuitenkin epävarmaa, eikä faasitransition täsmällistä sijaintiakaan tunneta korkeilla tiheyksillä. Tämä kuvaa QCD-tutkimuksen haastavuutta: vuorovaikutuksen voimakkuuden johdosta häiriöteoreettiset työkalut eivät sovellu faasirakenteen määrittämiseen, ja kun ei-häiriöteoreettiset menetelmät kuten hilasimulaatiot toimivat vain pienillä tiheyksillä, liittyy mm. ydin- ja kvarkkiaineen väliseen transiatioon paljon avoimia kysymyksiä (Brambilla et al., 2014). Niiden selvittäminen vaatii aivan uuden lähestymistavan, jossa niinkin kaukainen tieteenala kuin astrofysiikka voi osoittautua hyödylliseksi työkaluksi.

3. Neutronitähtien fysiikkaa

Neutronitähdet ovat kokoonluhistuneita vanhoja tähtiä, jotka ovat syntyneet, kun alkuperäisen vetyä polttavan tähden fuusioprosessiin käyttökelpoinen materiaali on huvennut eikä sen säteilypaino enää kykene vastustamaan painovoimaluhostumista (Glendenning, 1997). Riittävän massiivinen tähti käy tällöin läpi supernovaräjähdyksen, jossa sen ydin romahtaa joko mustaksi aukoksi tai neutronitähdiksi. Jälkimmäisessä tapauksessa tähden pitää kasassa yksittäisten nukleonien – etupäässä neutronien – ns. degeneraatiopaine, joka on seurausta Paulin kieltoäännöstä: kahta identtistä fermionihukkasta ei voi laittaa samaan kvanttitilaan. Neutronitähden massa on tyypillisesti yhden ja kahden

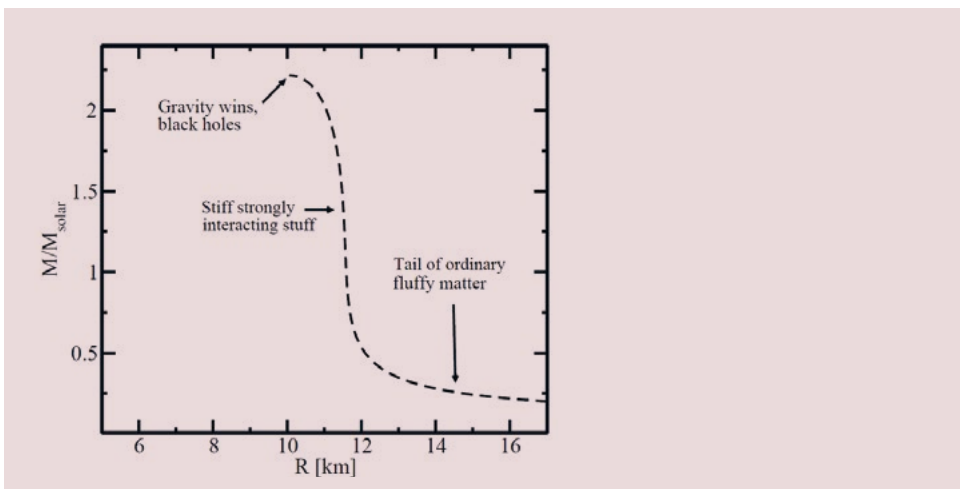
aurionon massan välissä, mutta säde vain 12-13 kilometriä; ne ovat siis äärimmäisen tiheitä ja kompakteja astrofysikaalisia kohteita, ja yksi millilitra neutronitähtiainetta painaisikin n. 200 miljardia kilogrammaa.

Neutronitähtien valtavasta tiheydestä johtuen painovoima niiden pinnalla ja sisällä on äärimmäisen vahva, ja suhteellisuusteoreettiset efektit täytyykin ottaa huomioon lähes kaikkien fysikaalisten ilmiöiden tarkastelussa. Yhtenä esimerkkinä mainittakoon valonsäteiden voimakas kaareutuminen neutronitähtien lähellä, joka johtaa siihen, että ulkopuolinen havaitsija näkee neutronitähtien pinnasta reilusti yli puolet. Neutronitähtien pinta on painovoiman vaikutuksesta lisäksi valtavan sileä, ja neutronitähtien ”vuoret” ovatkin korkeudeltaan vain millimetrien luokkaa. Tähtien sisällä aineen koostumus muuttuu puolestaan pinnan atomaarisesta kaasusta neutroneista koostuvan tiiviin ydinaineen kautta aina äärimmäisen tiheään ytimeen, jonka tarkka koostumus

on pitkälti hämärän peitossa.

Miten vähintään satojen valovuosien päässä meistä sijaitsevien ja vain parikymmentä kilometriä läpimitaltaan olevien tähtien havainnointi voi sitten kertoa jotain niiden ytimissä piilevän aineen ominaisuuksista ja QCD:n faasirakenteesta? Tämän yllättävän ja epäintuitiivisen asian taustalla lymyää Einsteinin yleinen suhteellisuusteoria, jonka ns. Tolman-Oppenheimer-Volkoff (TOV) -yhtälöt (Oppenheimer ja Volkoff, 1939) kuvaavat hydrostaattista tasapainoa tähden sisällä. Pyörimättömän ja siten pallosymmetrisen tähden tapauksessa kyseessä on kaksi lineaarista ja tavallista ensimmäisen kertaluvun differentiaaliyhtälöä kolmelle suurelle, jotka ovat neutronitähtiaineen paine ja energiatiheys tähden keskipisteestä lasketun säteen r funktiona sekä r -säteisen pallon sisään jäävän tähden osan massa.

Jos paineen ja energiatheyden välinen funktionaalinen relaatio $p(\epsilon)$ eli neutronitähtiaineen tilanyhtälö tunnetaan,



Kuva 2. Neutronitähtien massa-säde-taso (MR-taso), johon on piirretty yhtä tilanyhtälöä $p(\epsilon)$ vastaava MR-käyrä. Lähde: Alekski Kurkela.

voidaan TOV-yhtälöt ratkaista numeerisesti ratkaisun antaessa tähtien mahdollisten säteiden R arvot massan M funktiona. Tämä ns. MR-relaatio vastaa yhtä käyrää näiden kahden suureen virittämällä tasolla (ks. kuva 2), jonka päälle kaikki tarkat yksittäisten neutronitähtien massa-sädemittaukset tulevat ainakin periaatteessa putoamaan. Kukin tilanyhtälö vastaa yhtä MR-käyrää, joka päättyy maksimaalisen massan kohtaan, missä käyrä osoittaa vaakasuoraan vasemmalle: tämä piste vastaa tähden tuleamista epävakaaiksi säteen suuntaisille oskillaatioille ja sen luhistumista aina mustaksi aukoksi saakka.

Käytännössä neutronitähtiaineen tilanyhtälöä on äärimmäisen vaikea määrittää puhtaasti teoreettisen ydin- ja hiukkasfysiikan keinoin, minkä vuoksi yhteys MR-mittausten ja neutronitähtiaineen tilanyhtälön välillä onkin viime vuosina pyritty kääntämään ”ylösalaisin”. Lukuisat tarkat MR-mittaukset ja niitä täydentävät muut neutronitähtihavainnot voisivat ainakin periaatteessa kertoa TOV-yhtälöiden kautta, miten aine neutronitähtien sisällä käyttäytyy. Tällä hetkellä etenkin sädemittausten epävarmuudet ovat ikävä kyllä vielä liian suuria, jotta ne pystyisivät yksinään ratkaisemaan ongelman. Kuten seuraavassa luvussa tullaan näkemään, neutronitähtimittaukset ovat kuitenkin jo tähän mennessä johtaneet tiheän QCD-aineen termodynaamisten ominaisuuksien merkittävään tarkentumiseen, ja tulevaisuudessa niiden toivotaan ratkaisevan mm. sen, löytyykö neutronitähtien ytimistä pitkään etsittyä kvarkkiainetta.

4. Havaintojen ja teoreettisten tulosten yhdistämisestä

Kylmän ja tiheän QCD-aineen tilanyhtälö pystytään määrittämään teoreettisen hiukkas- ja ydinfysiikan työkaluja käyttäen kahdella eri rajalla: matalilla tiheyksillä aina ydinaineen saturaatiotiheyteen (yksittäisen neutronin tai protonin tiheys) n_s saakka sekä hyvin korkeilla tiheyksillä n. $40n_s$:stä alkaen. Näiden rajojen väliin jää kuitenkin laaja tiheysalue, jossa mikään nykyfysiikan metodi ei pysty ratkaisemaan kyseistä suuretta. Ikävä kyllä tämä eikenenkään-maa pitää sisällään juuri ne kaikkein mielenkiintoisimmat tiheydet $(2-10)n_s$, jossa raskaiden neutronitähtien ytimet sijaitsevat ja jossa ydinaineen odotetaan muuntuvan kvarkkiaineeksi. Juuri tässä alueessa myös neutronitähtihavaintojen merkitys QCD-aineen ominaisuuksien rajaamisessa tulee erityisen selkeästi näkyville.

Yllä kuvatun ongelmallisen tiheysalueen kuvailemiseksi on valittavissa ainakin kolme erilaista lähestymistapaa:

1) Ratkaistaan QCD:n sijaan jonkinlainen efektiivinen malli, jolla on samankaltaisia ominaisuuksia kuin ”emoteoriolla”, ja toivotaan, että malli todella kuvaa QCD:n termodynamiikkaa riittävällä tarkkuudella.

2) Käytetään QCD:n ratkaisemiseen kvanttikenttäteorian uusimpia työkaluja kuten ns. AdS/CFT-dualiteettia, joka mahdollistaa tiettyjen QCD:n kaltaisten teorioiden ratkaisemisen säieteoriaa ja yleistä suhteellisuusteoriaa käyttäen.

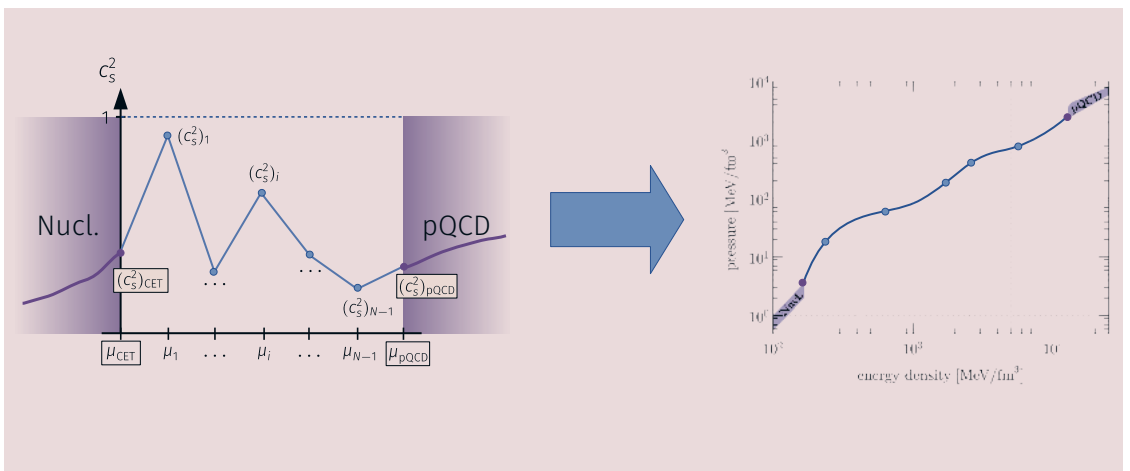
3) Sallitaan tilanyhtälölle kaikki

fysikaalisesti mahdolliset käytökset luomalla laajoja kirjastoja mahdollisista (oikeat matalan ja korkean tiheyden rajat omaavista) tilanyhtälöistä ja käytetään astrofysikaalisia havaintoja poistamaan kaikki niiden kanssa yhteensopimattomat tilanyhtälöt tästä joukosta.

Näistä vaihtoehdoista ensimmäisen huonona puolena ovat vaikeasti kontrolloitavat kvantitatiiviset epävarmuudet, kun taas toinen vaihtoehto on vielä pitkälti kehitysvaiheessa, eikä luotettavia ennusteita ole siksi välittömästi luvassa sieltäkään. Tarkastellaan siis alla sekä seuraavassa luvussa lähemmin sitä, millaisiin käytännön laskuihin ja tuloksiin kaikkein konservatiivisin vaihtoehto 3 johtaa [ks. esim. (Annala et al., 2018)].

Tuottaaksemme kaikki fysikaalisesti mahdolliset neutronitähtiaineen tilanyhtälön käytökset kannattaa aloittaa funktiosta $p(n)$, missä n on baryonitiheys, ja ottaa sen matalan ja korkean tiheyden rajat suoraan ydin- ja hiukkasfysiikan teoreettisista

laskuista. Näiden rajojen väliin jäävä alue jaetaan tyypillisesti useaan (käytännössä neljään tai viiteen) osaan, joissa kussakin fysikaalista painetta approksimoidaan jollain yksinkertaisella funktionaalisella muodolla. Tällaisia muotoja ovat esimerkiksi ns. polytrooppiset tilanyhtälöt $p(n)=an^\gamma$, joita generoidaan valitsemalla parametrit γ satunnaisesti (kertoimet a seuraavat paineen jatkuvuudesta), sekä funktiot, jotka muodostetaan integroimalla paloittain lineaarista äänennopeuden neliötä $c_s^2(\mu)$ baryonisen kemiallisen potentiaalin funktiona (ks. kuva 3). Tällaisia tilanyhtälöitä generoidaan sitten valtava määrä – tyypillisesti joitakin miljoonia – ja kukin näin rakennettu tilanyhtälö sijoitetaan TOV-yhtälöihin, joista vastaavat neutronitähtien MR-relaatiot ratkaistaan. Tämä mahdollistaa erityisesti tilanyhtälöperheen välittömän vertailun astrofysikaalisiin mittauksiin, koska kaikki tilanyhtälöt, jotka ovat selkeässä ristiriidassa jonkin varman havainnon kanssa, voidaan saman tien hylätä.



Kuva 3. Tilanyhtälön luominen äänennopeuden neliöstä lähtien. Tällä metodilla luotua tilanyhtälöperhettä käytettiin esim. julkaisuissa (Annala et al., 2020) ja (Annala et al., 2021).

Mitkä sitten ovat niin varmoja havaintoja, että niitä voidaan käyttää muuten mahdollisten tilanyhtälöiden poistamiseen? Yleissääntönä on pidetty ns. 2 sigman (yli 90 %) todennäköisyyden omaavia tuloksia, joita löytyy ainakin neljää eri perustyyppiä:

1) Neutronitähtien melko tarkkoja massamittauksia on tehty jo useamman vuosikymmenen ajan. Ne ovat osoittaneet, että raskaimmat neutronitähdet ovat vähintään n. kahden auringon massan kokoisia (toisaalta paljoo tätä massiivisempia tähtiä ei ole löydetty), minkä johdosta voimme hylätä kaikki tilanyhtälöt, joita vastaavat MR-käyrät päättyvät ennen tätä raja-arvoa.

2) Neutronitähtien sädemittaukset ovat teknisesti huomattavasti haastavampia, mutta aivan viime aikoina niitäkin on onnistuttu suorittamaan parille yksittäiselle tähdelle, joiden massa on melko tarkkaan tunnettu. Kaikkein hyödyllisin näistä on NICER-kollaboraation pulsarille J0740+6620 suorittama mittausta [ks. esim. (Riley et al., 2021)], jonka mukaan tämän n. kahden auringon massaisen tähden säde on vähintään n. 11 km ja todennäköisesti jopa yli 12 km.

3) Vuonna 2017 LIGO ja VIRGO -kollaboraatiot raportoivat ensimmäistä kertaa mittauksesta, jossa havaittiin kahden neutronitähden törmäyksessä syntyneitä gravitaatioaaltoja (LIGO Scientific and Virgo, 2017). Kyseinen havainto asetti ylärajan neutronitähtien vuorovesideformabiliteetille, eli sille, kuinka paljon vuorovesivoimat muuttavat neutronitähden muotoa. Tämä suure on laskettavissa annetusta tilanyhtälöstä, joten mittausta antaa suoran tavan verrata tilanyhtälöitä.

4) Edellisessä kohdassa mainittu GW170817-neutronitähtitörmäys synnytti myös elektromagneettisena säteilynä havaitun signaalin, joka piti sisällään 1.7 sekuntia gravitaatioaalto-signaalin jälkeen saapuneen lyhyen gammasädepurkauksen (LIGO Scientific & al., 2017). Tämän purkauksen on tulkittu syntyneen törmäyksen lopputuotteen romahdettua mustaksi aukoksi, mikä antaa ylärajan maksimaalisen massiivisen stabiilin neutronitähden massalle.

Seuraavaksi käyn lyhyesti läpi tuloksia, jotka on saatu yhdistämällä ydin- ja hiukkasfysiikan teoreettisia tuloksia neutronitähtihavaintojen kanssa ylläkuvaulla tavalla.

5. Kvarkkiainetta näköpiirissä

Viimeisten vuosien aikana tutkimusryhmäni on yhdessä yhteistyökumppaniemme kanssa julkaissut sarjan artikkeleita, joissa tavoitteena on ollut rakentaa laajoja tilanyhtälöperheitä ja rajata niitä käyttäen hyväksi kaikkia saatavilla olevia astrofysiikkalaisia havaintoja. Artikkelissa (Annala et al., 2018) johdimme ensimmäisen malliriippumattoman tilanyhtälöperheen, joka otti huomioon LIGO- ja Virgo-kollaboraatioiden GW170817-havainnon yhteydessä tekemät vuorovesideformabiliteettimitaukset, ja artikkelissa (Annala et al., 2020) esittelimme ensimmäiset todisteet kvarkkiaineytimien olemassaololle ainakin kaikkein massiivisimpien neutronitähtien sisällä. Uusimmat tuloksemme julkaistiin kuitenkin vasta aivan hiljattain artikkelissa (Annala et al., 2021), jonka tuloksia käyn

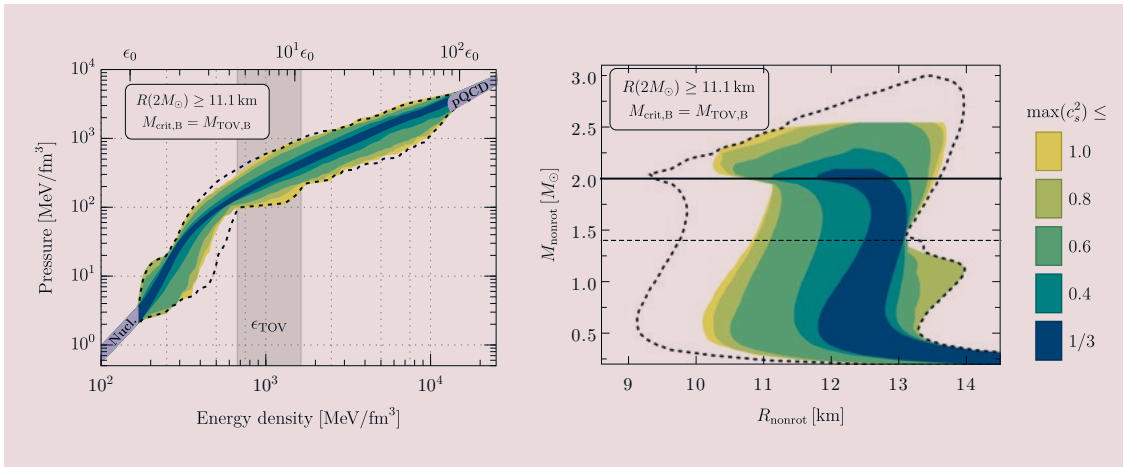
alla lyhyesti läpi. Uutta tässä työssä oli, että siinä käytettiin hyväksi kaikkia neljää edellisessä luvussa esiteltyä neutronitähtihavaintojen perustyyppiä aina sädemittauksista mustan aukon todennäköiseen muodostumiseen GW170817-törmäyksen yhteydessä. Kaikkien havaintotyyppien vaikutus tilanyhtälöperheen kokoon ja ominaisuuksiin osoittautui huomattavaksi.

Kuvassa 4 nähdään vierekkäin artikkelissa (Annala et al., 2021) johdettu neutronitähtien tilanyhtälöperhe sekä näitä tilanyhtälöitä vastaava MR-käyrien joukko. Kuvien värikoodi liittyy siihen, että tässä työssä tilanyhtälöiden interpolatio aloitettiin äänennopeudesta, mikä mahdollistaa niiden luokittelun korkeimman millään tiheydellä saavutetun äänennopeuden neliön arvon mukaan. Kuten kuvasta nähdään, tilanyhtälö olisi hyvin tarkkaan tunnettu, jos tietäisimme, ettei äänennopeuden neliö voi koskaan ylittää konformikenttäteorioista tuttua arvoa $1/3$, mutta jos suureen annetaan saavuttaa mikä tahansa valonnopeutta $c \equiv 1$ pienempi arvo,

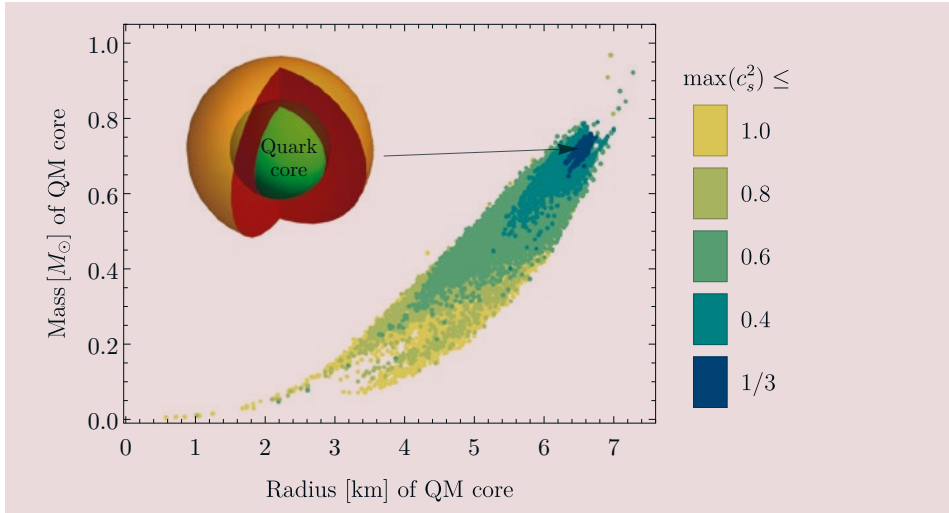
kasuvat epävarmuudet huomattavasti. Tässä työssä käytettyjen uusien rajoitteiden (sädemittaukset ja mustan aukon syntyminen GW170817-törmäyksen lopputuotteena) vaikutus nähdään puolestaan helposti vertaamalla väritettyjä alueita katkoviivalla esitettyyn aiempaan tulokseen.

Neutronitähtiaineen tilanyhtälön tarkentamisen lisäksi ehkä merkittävin artikkelien (Annala et al., 2020) ja (Annala et al., 2021) tulos liittyy rajoihin, joita niissä pystyttiin johtamaan aineen ominaisuuksille kaikkein massiivimpien neutronitähtien ytimissä. Matalan tiheyden ydinaineen ja hyvin korkean tiheyden kvarkkiaineen ominaisuudet tunnetaan varsin hyvin ja ne eroavat monessa suhteessa:

- Äänennopeuden neliö kvarkkiaineessa on ainakin korkeissa tiheyksissä alle $1/3$ kun taas ydinaineessa se nousee nopeasti tiheyden mukana saavuttaen hyvin todennäköisesti ainakin arvon 0.5 ja päättyen kenties jopa lähelle valonnopeutta.



Kuva 4. Vasemmalla neutronitähtien tilanyhtälöperhe ja oikealla sitä vastaava MR-käyrien joukko. Lähde: (Annala et al., 2021).



Kuva 5. Maksimaalisen massiivisten neutronitähkien kvarkkiytimien koko äänennopeuden maksimi-arvon funktiona. Kuva on otettu artikkelista (Annala et al., 2020).

- Ns. polytrooppinen indeksi

$\gamma \equiv \frac{d \ln p}{d \ln \epsilon}$ saa ydinaineessa arvoja $\gamma \geq 2.5$ mutta kvarkkiaineessa vain $\gamma \approx 1$.

- Paine jaettuna vapaan (vuorovaikuttamattoman) teorian paineella saa ydinaineessa pieniä arvoja $\frac{p}{p_{\text{vapaa}}} \lesssim 0.1$

kun taas kvarkkiaineessa $\frac{p}{p_{\text{vapaa}}} \gtrsim 0.4$.

Vertaamalla aineen ominaisuuksia massiivisimpien stabiilien neutronitähkien keskellä näihin odotuksiin päädyimme artikkelissa (Annala et al., 2020) mielenkiintoiseen johtopäätökseen: tiheän QCD-aineen ominaisuudet massiivisten neutronitähkien keskellä ovat tyypillisesti paljon lähempänä kvarkki- kuin ydinainetta. Tämä havainto on ensimmäinen konkreettinen todiste sen puolesta, että kvarkkiaineesta koostuvat ytimet ovat neutronitähdissä paitsi mahdollisia myös

todennäköisiä. Kuvassa 5 kvarkkiaineitymien koko maksimaalisen massiivisissa neutronitähdissä on esitetty äänennopeuden ylärajan funktiona; kuten kuvasta nähdään, kvarkkiytimet ovat kookkaita varsinkin silloin, jos äänennopeuden neliö ei koskaan ylitä arvoa 0.6.

Aivan varmaa kvarkkiydinten olemassaolo raskaiden neutronitähkien sisällä ei kuitenkaan ole: on myös mahdollista, että neutronitähkien fysikaalinen MR-käyrä päättyy vahvaan ensimmäisen kertaluvun deconfinement-transitioon, joka tekee tähdistä epästabiileja ja johtaa vähänkin kvarkkiainetta sisältävien neutronitähkien luhistumiseen mustiksi aukoiksi. Tämän skenaarion todennäköisyyttä voidaan arvioida käyttämällä hyväksi ns. Bayesilaista päättelyä, minkä työskentelemmekin paraikaa tutkimusryhmäni ja sen kollaboraattoreiden voimin. Alustavat tulokset viittaavat siihen, että kvarkkiytimien

olemassaolo on erittäin todennäköistä, mutta löydön vahvistaminen vaatii vielä lisää työtä.

6. Loppusanat

Neutronitähdet sisältävät kaikkein tiheintä ainetta koko nykymaailmankaikkeudessa. Niiden ytimissä vallitsevien äärimmäisten olosuhteiden vuoksi neutronitähtien havainnoiva tutkimus paitsi valottaa näiden kohteiden astrofysiikkaa, voi myös ratkaista merkittäviä avoimia ongelmia hiukkas- ja ydinfysiikassa. Erityisen kiinnostuksen kohteena on viime vuosina ollut kysymys värivankeudesta vapautuneen kvarkkiaineen mahdollisesta olemassaolosta raskaiden neutronitähtien ytimissä. Varmistuessaan näiden kvarkkiytimien löytö edustaisi ensimmäistä havaintoa tästä aineen eksoottisesta olomuodosta luonnossa ja olisi merkittävä tulos niin astro- kuin hiukkasfysiikan sarjoilla.

Kenties merkillepantavinta neutronitähtiytimien tutkimuksessa on se tapa, jolla 10^{15} metrin pituusskaalaa käsittelevää QCD-fysiikkaa pystytään tutkimaan käyttäen hyväksi havaintoja parikymmentä kilometriä läpimitaltaan olevista objekteista, jotka sijaitsevat tuhansien (esim. pulsari J0740+6620:n tapaus) tai jopa satojen miljoonien valovuosien (esim. GW170817 törmäyksen tähdet) päässä meistä. Neutronitähtien tutkimuksessa mikroskooppisen pieni ja tähtitieteellisen suuri siis kirjaimellisesti tapaavat toisensa!

Kirjoittaja

Aleksi Vuorinen

Aleksi Vuorinen (s. 1980) on suomalainen hiukkasfyysikko, joka opiskeli teoreettista fysiikkaa Helsingin yliopistossa ja väitteli Keijo Kajantien ohjauksessa loppuvuodesta 2003. University of Washingtoniin sekä CERN:iin sijoittuneiden postdoc-kausien jälkeen hän perusti vuonna 2009 oman ryhmänsä Bielefeldin yliopistoon Saksaan, josta hän palasi 2013 Helsinkiin ensin akatemiaturkijaksi ja myöhemmin teoreettisen alkeishiukkasfysiikan apulais- ja täydeksi professoriksi.



Kuva: Veikko Kähkönen

Lähdeluettelo

Schwartz, M. (2013).

Quantum Field Theory and the Standard Model. Cambridge University Press.

Brambilla, Nora & al. (2014). QCD and Strongly Coupled Gauge Theories: Challenges and Perspectives. *Eur. Phys. J. C*, 10, 2981. doi:10.1140/epjc/s10052-014-2981-5.

Glendenning, N. (1997). *Compact stars: Nuclear physics, particle physics, and general relativity*. Springer Publishing.

Oppenheimer, R. & Volkoff, G. (1939). On massive neutron cores. *Physical Review*, 55.

Annala, E. & al. (2018). Gravitational-wave constraints on the neutron-star-matter Equation of State. *Physical Review Letters*, 120, 17. doi:10.1103/PhysRevLett.120.172703.

Annala, E. & al. (2020). Evidence for quark-matter cores in massive neutron stars. *Nature Physics*, 16. doi:10.1038/s41567-020-0914-9.

Annala, E. & al. (2021). Multi-messenger constraints for ultra-dense matter. arXiv:2105.05132 [astro-ph.HE]. Hyväksytty julkaisuun *Physical Review X*.

Riley, T. & al. (2021). A NICER View of the Massive Pulsar PSR J0740+6620. *Astrophys. J. Lett.*, 918, 2, L27. doi:10.3847/2041-8213/ac0a81.

LIGO Scientific and Virgo Collaborations (2017). GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral. *Physical Review Letters*, 119, 16. doi:10.1103/PhysRevLett.119.161101.

LIGO Scientific & al. (2017). Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger. *Astrophys. J. Lett.*, 848, 2, L12. doi:10.3847/2041-8213/aa91c9.

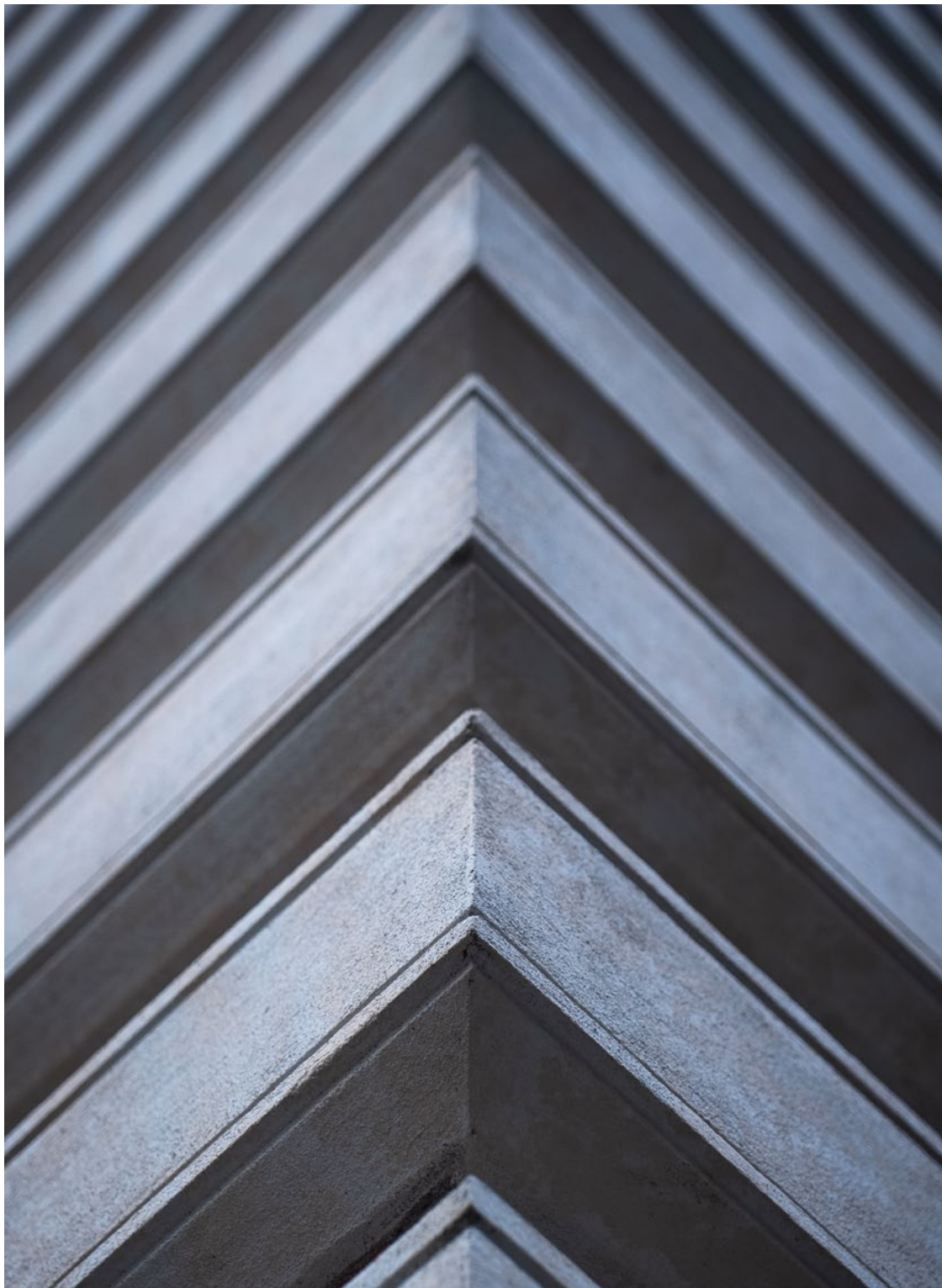




#3

Oikeusvaltio ja oikeusvarmuus Euroopan unionissa

Juha Raitio



Abstract

In this article the EU concepts of rule of law and legal certainty are studied from the perspective of legal theory and EU law. The rule of law and legal certainty are both underlying principles of Western societies. They are neither defined in any paragraph of national laws nor in international treaties. Both are principles, which comprise various more precise principles from the perspective of their scope of application. The rule of law is both normative and legal cultural principle, which illustrates the legal system of an active civil society in the European context. Legal certainty, in turn, relates especially to the demand of predictability in legal decision-making, which is one of the elements of the rule of law as well. Both the rule of law and the principle of legal certainty have formal and substantive meaning, which can be illustrated by referring to the Article 2 TEU according to which the rule of law requires liberal democracy and the protection of human rights.

1. Johdanto

Oikeusvaltio on hyvin ajankohtainen aihe eurooppalaisessa oikeuden ja politiikan tutkimuksessa. Euroopan unioni on viime vuosina kehittänyt oikeusvaltiollisuutta monin eri tavoin. Esimerkiksi komissio julkaisi vuonna 2014 toimintakehyksen (COM (2014) 158 final), jolla torjutaan oikeusvaltion systeemisii eli järjestelmätsion uhkia jäsenvaltioissa. Muita esimerkkejä ovat Euroopan unionin perusoikeusviraston (FRA) perustaminen ja toiminta (ks. esim., Neuvoston asetus (EY) N:o 168/2007; FRA Opinion – 2/2016), SEU 7 artiklan menettely (ks. esim. asia T-337/03, joka koski silloisen EU 7 artiklan nykyistä SEU 7 artiklaa vastaavaa menettelyä) valvoa SEU 2 artiklan mukaisten arvojen loukkaamattomuutta, komission vuosittaisiin ns. oikeusvaltioraportteihin johtanut kehitys (ks. European Parliament resolution of 25 October 2016) ja viimeisimpänä uudistuksena ns. ehdollisuusjärjestelmäasetuksen (EU, Euratom) 2020/2092 edellyttämä oikeusvaltiollisuuden toteutuminen EU:n varoja saavan jäsenvaltion hallinnossa. Lisäksi EU-tuomioistuimien on tunnustanut oikeusvaltion merkittävän periaatteellisen painoarvon oikeuskäytännössään (asia C-619/18 R, kohdat 81–84). Käytännössä etenkin Puolan ja Unkarin oikeusvaltiollisuuteen liittyvät ongelmat ovat olleet usein sekä komissiossa (ks. oikeusvaltioraportit eli komission tiedonannot COM (2020) 580 final; COM (2021) 700 final) että EU-tuomioistuimissa tutkittavina etenkin liittyen tuomioistuimien riippumattomuuteen (asia C-64/16, kohdat 30, 36; Puolaa koskien, asiat C-216/18 PPU, kohta 48; C-619/18, kohta 21; C-619/18 R; C-192/18; C-558/18 & C-563/18; C-791/19; C-55/20).

Oikeusvaltiollisuuden toteutumisella on perustavanlaatuisen merkitys paitsi kansanvallan ja perusoikeuksien turvaamiselle, myös käytännön oikeudenhoidolle kansallisella tasolla. EU-oikeus asettaa tiettyjä reunaehtoja esimerkiksi jäsenvaltioiden tuomioistuinelaitoksien rakenteelliselle riippumattomuudelle. EU:n sisäinen oikeusalue – ”vapauden, turvallisuuden ja oikeuden alue” – rakentuu jäsenvaltioiden keskinäiselle luottamukselle ja siihen läheisesti liittyvälle vastavuoroisen tunnustamisen periaatteelle. Negatiivinen oikeusvaltiokehitys on noussut esiin erityisesti oikeudenkäynnissä, jotka ovat koskeneet rikoksentehtäjän tai rikoksesta epäillyn luovuttamista jäsenvaltioiden välillä (ks. esim. asia C-216/18). Oikeusvaltio-ongelmien ilmetyä tuomarit ovat olleet haluttomia luovuttamaan henkilöä jäsenvaltioon, jonka oikeusvaltiorakenteiden kestävydestä – esimerkiksi tuomioistuinelaitoksen riippumattomuudesta – on ollut epäilystä. Epävarmuus EU:n sisällä voi johtaa eri jäsenvaltioiden oikeusviranomaisten keskinäisen luottamuksen murenemiseen, millä voi olla laajakantoisia vaikutuksia paitsi rikosoikeudellisille luovuttamismenettelyille, myös lukuisille muille vastavuoroisen tunnustamisen periaatteelle rakentuville sääntelytoimille. Kyseinen sääntelytekniikka nimittäin läpäisee EU-oikeuden koskien muiden ohella esimerkiksi turvapaikkahakemusten käsittelyä, siviilioikeudellisten tuomioiden täytäntöönpanoa ja tavaroiden liikkumista sisämarkkinoilla. Näiden oikeusvaltiollisuutta edistävien toimenpiteiden ja oikeusvaltiollisuutta uhkaavien kehityskulkujen taustoittamiseksi voidaan esittää kysymys, millä tavoin oikeusvaltio ja oikeusvarmuus ymmärretään Euroopan unionissa.

2. Oikeusvaltio edellyttää oikeusvarmuutta

Oikeusvaltio ja oikeusvarmuus ovat oikeusperiaatteina tulkinnallisesti läheisessä yhteydessä toisiinsa, mutta niillä on eri merkityssisältö. Oikeusvaltio-periaate asettaa pidäkkeitä vallankäytölle ja pyrkii estämään vallan väärinkäytön. Näitä vallankäytön pidäkkeitä syntyy vapaassa ja demokraattisessa kansalaisyhteiskunnassa esimerkiksi jokaisen oikeussuojaa turvaavien prosessuaalisten periaatteiden ja erilaisten perus- ja ihmisoikeuksien kautta. Vastakohtana tällaiselle liberaaliin demokratiaan kytkeytyvälle oikeusvaltiollisuudelle on epäliberaalin demokratian

Liberaalin ja epäliberaalin demokratian yhteensopimattomuus aiheuttaa ongelmia EU:n yhtenäisyydelle

delle on epäliberaalin demokratian autoritäärisen hallinnon käsitys oikeusvaltiosta, jossa oikeus on keino käyttää valtaa, jossa tuomioistuimet eivät ole riippumattomia ja jossa valistuksen ajoista periytyvää jakoa lainsäädäntö-, tuomio- ja toimeenpanovaltaan ei noudateta. Hirvosen (2021,

erityisesti s. 325) sanoin epäliberaaleilla valtioilla on etno-nationalistinen fantasia-kansa vailla demokratiaa, oikeusvaltiota ja ihmisoikeuksia.

Tämä liberaalin ja epäliberaalin demokratian (*illiberal democracy*, ks. esim. Bugarič, 2016) yhteensopimattomuus aiheuttaa nykyisin ongelmia EU:n yhtenäisyydelle, mikä heijastuu esimerkiksi edellä viitatuissa Puolaa ja Unkaria koskeneissa oikeustapauksissa. Ehkä on vertailun vuoksi hyvä todeta, että Itä-Euroopan maissa kommunistihallinnon aikana oikeus ymmärrettiin hallinnon työkaluksi saavuttaa yhteiskuntapoliittisia tavoitteita, eli siis hallituksen vallankäytön välineeksi, ei pidäkkeeksi (Rule by law -ajattelusta Itä-Euroopassa ks. Sajo, 1996). Oikeusvaltion määrittelyä leimaa siten kontekstisidonnaisuus ajan ja paikan suhteen.

Oikeusvaltio-periaate on siten paitsi normatiivinen myös oikeuskulttuurinen käsite (Tuori, 2007, s. 222). Tuorin (2000, s. 163–216; 2002a, s. 147–196) kriittisen oikeuspositivismin perusteeksi oikeuden pinta- ja syvätasosta selkeyttää oikeusvaltio-käsitteen moniulotteisuutta. Oikeuden pintatasolla ei ole oikeusvaltion määritelmäksi soveltuvaa erityistä normiformulaatiota, siis pykälää, momenttia tai artiklaa säännöstekstissä. Oikeuden syvemmillä tasoilla sen sijaan oikeuskulttuurin ja vuosisatojen kehityksen tuloksena on vakiintunut se tulkintakonteksti, jossa oikeusvaltiollisuus voidaan ymmärtää yhtenä demokraattisen kansalaisyhteiskunnan keskeisenä osatekijänä. On selvää, ettei oikeusvaltio-käsite ole syntynyt eikä kehittynyt ilman kansainvälisiä vaikutteita. Kotimaista ja eurooppalaista tulkintaa oikeusvaltio-periaatteesta on leimannut vertailu etenkin angloamerikkalaiseen *rule of law* -käsitteeseen ja saksalaiseen

Rechtsstaat-käsitteeseen (Ks. esim. Jyränki, 1978, s. 41–42; Tuori, 2002b, s. 49–65; Raitio, 2003, s. 134–146; Tuori, 2007, s. 221–247).

Myös oikeusvarmuuden periaate on niin moniulotteinen, ettei siitä ole erityistä normiformulaatiota määritelmäksi. Esimerkiksi Groussot (2006, s. 189) on katsonut, että oikeusvarmuus heijastaa vaatimusta oikeusjärjestelmän selkeydestä, vakaudesta ja rationaalisuudesta. Suomessa oikeusvarmuutta on pidetty perinteisesti melko muodollisena periaatteena. Esimerkiksi Nieminen (2004, s. 107) on tulkinnut oikeusvarmuuden olevan oikeusvaltiollisuuden muodollinen puoli, joka viittaa suurelta osin lainkäytön ennakoitavuuteen ja siten lainalaisuusperiaatteeseen. Oikeusvarmuudella on silti myös aineellinen puoli, jonka voidaan tulkita olevan oikeudenmukaisuuden toteutuminen. Se puolestaan liittyy siihen, että valtioelimet ovat sidottuja turvaamaan jokaisen perus- ja ihmisoikeudet. Oikeusvarmuuden periaatetta on siten määritelty sekä muodollisena että aineellisena periaatteena.

Analyttisen oikeustieteen piirissä Aarnio (1987, s. 3; 1997, s. 191) ja Peczenik (1989, s. 32) ovat katsoneet oikeusvarmuuden periaatteen edellyttävän, että oikeusvaikutuksen omaavien päätösten tulee olla sekä ennakoitavia että hyväksyttäviä. Oikeusvarmuuden periaatteeseen liittyvä oikeusturvaodotus voidaan liittää kahteen seikkaan: mielivallan ja ennakoimattoman lainkäytön kieltoon sekä siihen, että päätöksen tulee vastata kyseessä olevan oikeuskulttuurin vakiintuneita arvoja ja tietoja todellisuudesta (ks. Aarnio, 1987, s. 158–229, erityisesti rationaalisesta hyväksyttävyydestä, s. 188–193).

Edellytys oikeuden hyväksyttävyydestä voidaan liittää oikeusnormien pätevyyttä

koskevan akateemisen keskustelun piiriin (Aarnio, 1987, s. 33–38; Bengoetxea, 1993, s. 56–57; Wróblewski, 1992, s. 75–83). Oikeusnormien pätevyydelle on usein asetettu kolme kriteeriä, joille tutkijat ovat antaneet eri nimikkeitä. Siltala (2000, s. 182) on käyttänyt termejä positivistinen, sosiologinen ja aksiologinen (naturalistinen) pätevyys ja viitannut samalla vastavasti oikeuspositivismiin, oikeudellisen realismiin ja luonnonoikeusteorioiden keskeisiin postulaatteihin (Raitio, 2014, etenkin s. 522–526). Aarnio (1989, s. 84–89), puolestaan puhuu oikeusnormin hyväksyttävyydestä, oikeusnormien muodollisesta voimassaolosta ja voimassaolosta tehokkuutena, joka liittyy normien tosiasiallisiin vaikutuksiin yhteiskunnassa. Näistä oikeusnormien pätevyiden kolmesta kriteeristä olen johtanut oman käsitykseni oikeusvarmuuden periaatteen. Analogisesti tulkiten olen johtanut Wróblewskin (1992, s. 75–83) systeemisestä, faktuaalisesta ja aksiologisesta normien pätevyyttä koskevasta mallista oikeusvarmuuden periaatetta täsmentävät käsitteet muodollinen, faktuaalinen ja aineellinen oikeusvarmuus (Raitio 2003, s. 372–376). Aineellisen oikeusvarmuuden käsitettä on kritisoitu oikeuskirjallisuudessa siitä, että se sisältää toisiinsa nähden yhteensopimattomia arvoja ja intressejä niin, että niiden väliset kollisiot uhkaavat jäädä epämääräisen aineellisen oikeusvarmuuden käsitteen peittäviksi (Tuori 2003, s. 360–362).

Sittemmin esimerkiksi Paunio (2013) on myös turvautunut aarniolaiseen oikeusvarmuuden jaotteluun analysoidessaan monikielisen EU-tuomioistuimen ratkaisuita. Hän on valinnut oikeuskäytännöstä esimerkkinsä niin, että kielellisen tulkinnan ollessa riittämätöntä erikielisten

käännösversioiden ristiriitaisuuden vuoksi teleologinen tulkinta ja samalla aineellinen oikeusvarmuus korostuvat (ks. esim. asiat 100/84; C-428/02; C-161/06; C-506/06). Monissa tapauksissa oikeusvarmuus voidaan hänen mukaansa ymmärtää keinona oikeuttaa tietty lopputulos tai oikeudellinen tulkintaratkaisu. Oikeudellisten ratkaisuiden perusteluiden koherensси edistää nimenomaan oikeusvarmuuden aineellista ulottuvuutta. Eurooppalaisiin maihin kohdentuvan oikeusvertailun keinoin on myös voitu todeta tendenssi hakea tulkinnallista tasapainoa oikeusvarmuuden muodollisen ja aineellisen ulottuvuuden välille (Fenwick, Siems, & Wrba, 2017, s. 7).

3. Oikeusvaltio EU:ssa

Tarkastelun lähtökohtana on se, että nykyisten ja tulevien EU:n jäsenvaltioiden tulee sitoutua SEU 2 artiklasta ilmenevään EU:n arvopohjaan. Mainitussa artiklassa todetaan seuraavaa:

”Unionin perustana olevat arvot ovat ihmisarvon kunnioittaminen, vapaus, kansanvalta, tasa-arvo, oikeusvaltio ja ihmisoikeuksien kunnioittaminen, vähemmistöihin kuuluvien oikeudet mukaan luettuina. Nämä ovat jäsenvaltioille yhteisiä arvoja yhteiskunnassa, jolle on ominaista moniarvoisuus, syrjimättömyys, suvaitsevaisuus, oikeudenmukaisuus, yhteisvastuu sekä naisten ja miesten tasa-arvo.”

Oikeusvaltiollisuus on EU:n arvopohjan osana EU-jäsenyyden ehto. Vuonna 1993 Eurooppa-neuvosto selkeytti niitä ehtoja, joita EU-jäsenyyttä hakevien

maiden tulee täyttää. Näiden ns. Kööpenhaminan kriteereiden mukaisesti jäsenyyttä voivat hakea kaikki eurooppalaiset maat, jotka noudattavat vapauden, demokratian, ihmisoikeuksien, perusvapauksien kunnioittamisen ja oikeusvaltion periaatteita (Jääskinen, 2007, s. 61). Nykyisin oikeusvaltio-periaatteen kunnioittaminen jäsenyysehtona ilmenee perussopimuksesta, sillä SEU 49 artiklan mukaisesti SEU 2 artiklassa tarkoitettuja arvoja kunnioittava ja edistävä Euroopan valtio voi hakea Euroopan unionin jäsenyyttä. Oikeuskirjallisuudessa on perustellusti katsottu, että EU:n jäseneksi pyrkivän maan ihmisoikeustilannetta, demokratiaa ja oikeusvaltiollisuutta on perusteellisesti arvioitu, kun taas EU:n jäsenvaltioiden oikeusvaltio-periaatteen noudattamiseen tai ihmisoikeustilanteeseen on ollut selvästi hankalampi puuttua. (Raulus, 2016, s. 25-27).

Laajemmasta eurooppalaisesta näkökulmasta oikeusvaltiollisuutta tulee tulkita myös Demokratiaa oikeusteitse -komission eli niin kutsutun Venetsian komission työn pohjalta. Venetsian komissio luetteloi raportissaan oikeusvaltio-käsitteeseen sisältyvän seuraavia osatekijöitä:

- laillisuusperiaate, mikä viittaa lainsäädäntöprosessin läpinäkyvyyteen, vastuullisuuteen (*accountability*), demokraattisuuteen ja moniarvoisuuteen
- oikeusvarmuus
- toimeenpanovallan käyttäjien mielivaltaisuuden kieltö (*prohibition of arbitrariness*)
- pääsy riippumattomiin ja puolueettomiin tuomioistuimiin
- tehokas tuomioistuINVALVONTA, johon kuuluu perus- ja ihmisoikeuksien kunnioittaminen (*respect for human rights*, ks.

tehokkaan oikeussuojan vaatimuksesta esim. asia 294/83, kohta 23) ja

- yhdenvertaisuus lain edessä (Ks. Venetsian komissio, 2011, kohta 41, Pech, 2013, s. 115).

EU-oikeudessa oikeusvaltio on perustuslaillinen periaate, joka muodostuu sekä muotoa että sisältöä koskevista osatekijöistä (ks. oikeusvaltio-käsitteen sekä muodollista että aineellista ulottuvuutta koskevan tulkinnan tueksi esim. asiat C-50/00 P, kohdat 38–39; C-402/05 P & C-415/05, kohta 316 sekä ihmisoikeustuomioistuimesta *Stafford v. Yhdistynyt kuningaskunta*, kohta 63). Tämä tarkoittaa, että oikeusvaltioperiaatteen noudattaminen liittyy olennaisesti demokratian ja ihmisoikeuksien kunnioittamiseen niin, ettei demokratiaa voi olla eikä ihmisoikeuksia kunnioittaa, jos oikeusvaltioperiaatetta ei noudateta, ja päinvastoin (ks. esim. Broekman, 1999, s. 205). Oikeuskirjallisuudessa on erotettu oikeusvaltion aineellista ja muodollista ulottuvuutta korostava laaja tulkinta (*thick rule of law*) suppeasta tulkinnasta (*thin rule of law*), joka korostaa vain muodollista tulkintaa (ks. esim. McCorquodale, 2016, erityisesti s. 284–285; Pech, 2013, s. 108–129). Yksilöiden oikeussuojan korostus vaikuttaa vahvistavan oikeusvaltio-käsitteen laajaa tulkintaa (ks. esim. Von Bogdandy, Antpöhler & Ioannidis, 2017, erityisesti s. 226).

Varsin tuore oikeusvaltiollisuutta koskeva määrittely on ns. ehdollisuusjärjestelmäasetuksessa (EU, Euratom) 2020/2092, jonka johdanto-osion (*preamble*) 3 kohdassa todetaan viitteinen seuraavaa:

”Oikeusvaltioperiaate edellyttää, että julkinen valta toimii lainsäädännön

asettamissa rajoissa demokratiaa ja perusoikeuksien kunnioittamista koskevien arvojen mukaisesti, kuten Euroopan unionin perusoikeuskirjassa, jäljempänä ’perusoikeuskirja’, ja muissa sovellettavissa välineissä määrätään, ja että julkinen valta on riippumattomien ja puolueettomien tuomioistuinten valvonnassa. Oikeusvaltioperiaate edellyttää erityisesti, että noudatetaan laillisuuden periaatetta (asia C-496/99 P, kohta 63), joka merkitsee läpinäkyvää, vastuuvollista, demokraattista ja moniarvoista lainsäädäntöprosessia, sekä oikeusvarmuuden (asia 212–217/80, 10 kohta), toimeenpanovallan käyttäjien mielivaltaisuuden kiellon (yhdistetyt asiat 46/87 ja 227/88, kohta 19), riippumattomien ja puolueettomien tuomioistuinten takaaman tehokkaan oikeussuojan, mukaan lukien oikeussuojan saatavuus (asiat C-64/16, kohdat 40–41; C-216/18 PPU, kohdat 63–67), sekä vallanjaon (asiat C-477/16, 36 kohta; C-452/16, 35 kohta; C-279/09, 58 kohta) periaatteita.”

Asetuksen (EU, Euratom) 2020/2092 3 artiklassa on säännös oikeusvaltion periaatteiden rikkomisesta, jossa edellä mainitut oikeusvaltiollisuuden kriteerit otetaan huomioon, joskin niin, että oikeuslaitoksen riippumattomuuteen ja toimintaan liittyvät seikat korostuvat. On huomionarvoista, että ehdollisuusjärjestelmää koskevan asetuksen perusteluissa viitataan vuonna 2014 julkaistuun komission toimintakehykseen (COM (2014) 158 final), jolla torjutaan oikeusvaltion systeemisii eli järjestelmätason uhkia jäsenvaltioissa (tarkemmin, Leppävirta, 2016).

EU-tuomioistuin on hiljattain tulkinnut, että kyseinen ehdollisuusjärjestelmäasetus täyttää oikeusvarmuuden periaatteen vaatimukset ja että jäsenvaltiot

kykenevät riittävän tarkasti selvittämään oikeusvaltio-periaatteen keskeisen sisällön. EU-tuomioistuin selkeästi torjui ajatuksen siitä, että oikeusvaltio-periaate olisi siinä määrin monitulkintainen, ettei sillä voitaisi nähdä normatiivista sitovuutta ja jätti kumoamatta ehdollisuusjärjestelmäasetuksen. EU-tuomioistuin toi esiin, että ehdollisuusjärjestelmäasetuksessa viitataan oikeusvaltiollisuuden yhteydessä lainalaisuusperiaatteeseen, oikeusvarmuuden periaatteeseen, toimeenpanovallan väärinkäytön kieltoon, tehokkaan oikeus-suojan vaatimukseen ja vallanjako-oppiin, joista kaikista on EU-tuomioistuimen täsmentävää ja selkeyttävää oikeuskäytäntöä (ks. asia C-156/21, kohdat 200-201; vrt. kohdat 229, 230).

4. Oikeusvarmuus EU:ssa

Oikeusvarmuus on tarkkarajaisempi oikeusperiaate kuin vallan kolmijako-oppiin kytkeytyvä lähinnä valtiosääntöoikeudellisen ulottuvuuden omaava oikeusvaltio. EU-tuomioistuimen mukaan oikeusvarmuus edellyttää toisaalta lainsäädännöltä selkeyttä ja toisaalta lainkäytöltä ennakoitavuutta (ks. asiat C-308/06, kohta 69; C-110/03, kohta 30; C-156/21, kohta 223). Oikeuskirjallisuudessa on oikeusvarmuuden periaatteen yhteydessä usein korostettu, että kyseessä on yleinen oikeusperiaate, joka on yhteinen kaikille jäsenvaltioille. Schermersin ja Waelbroeckin (1992, s. 52–69) tavoin oikeusvarmuuden periaate voidaan jakaa seuraaviin osatekijöihin

- a) taannehtivien oikeusvaikutusten kielto
- b) oikeutettujen odotusten suoja
- c) saavutettujen oikeuksien suoja
- d) määräaikojen laskeminen
- e) ymmärrettävän kielen vaatimus.

Schermers ja Waelbroeck (1992, s. 53, jossa viitataan esim. asiaan 143/83) toteavat lisäksi, että kaikki keskeiset prosessuaaliset vaatimukset, esimerkiksi tuomioiden ja hallintopäätösten perusteluvaatimus, edistävät oikeusvarmuuden toteutumista. Perusteluvollisuutta edellytetään SEUT 296 artiklassa, jonka mukaan toimielinten säädökset perustellaan ja niissä viitataan perussopimuksissa määrättyihin ehdotuksiin, aloitteisiin, suosituksiin, pyyntöihin ja lausuntoihin. EU-oikeudessa perusteluvollisuus liittyy ehkä selvimmin EU:n toimielinten julkisuusperiaatteesta ja päätöksenteon avoimuudesta käytyyn keskusteluun (ks. esim. asiat. T-81/95; T-105/95).

Schermers ja Waelbroeck ovat liittäneet oikeusvarmuuden käsittelyn yhteyteen useita yleisiä oikeusperiaatteita, jotka turvaavat lainkäytön ennakoitavuutta. Ensinnäkin he mainitsevat periaatteen, jonka mukaan viranomaisten tulee noudattaa heitä sitovia säännöksiä ja vakiintuneita käytäntöjä (*patere legem quam ipse fecisti, Selbstbindung, estoppel*), mitä voidaan perustella oikeuskäytännön avulla (Schermers & Waelbroeck, 1992, s. 69; esim. asiat 432/85, kohta 15, 138/79, T-241/97). Tätä periaatetta voidaan luontevasti käsitellä myös luottamuksen-suojan periaatteen osatekijänä (ks. estoppel-doktriinista ja luottamuksensuojasta esim. Raitio, 2003, s. 200–214). Se, ettei samasta teosta saa rangaista kahdesti (*ne bis in idem*; ks. Euroopan unionin perusoikeuskirjan 50 artikla ja oikeuskäy-

tännöstä periaatetta rajaavia ja täsmentäviä esimerkkejä, kuten, asiat 14/68, kohta 11; 137/85, kohta 23; 45/69, kohdat 60–61 ja uudemmassa oikeuskäytännöstä esim. asia C-617/10), on omiaan turvaamaan ennakoitavan lainkäytön vaatimusta. Rangaistusta ei saa langettaa ilman tekohetkellä voimassa ollutta lakia (*nulla poena sine lege*; ks. Euroopan unionin perusoikeuskirjan 49 artikla, Euroopan ihmisoikeussopimuksen 7 artikla ja oikeuskäytännöstä esim. asia 63/83, kohta 22), mikä voidaan myös mieltää oikeusvarmuuden, erityisesti taannehtivuuskiellon, piiriin. Oikeusvarmuus on tullut punnittavaksi myös oikeusvoimaa (*res judicata*; ks. esim. asia C-529/09, kohdat 66–67) ja kansallista prosessiautonomiata koskevassa tulkintayhteydessä.

Vaikka oikeusvarmuudella onkin yhteyksiä moniin yleisiin oikeusperiaatteisiin, niin voidaan kuitenkin oikeuskäytännön perusteella tähdentää erityisesti oikeutettujen odotusten suojan ja taannehtivuuskiellon merkitystä oikeusvarmuuden keskeisimpinä osatekijöinä (ks. Raitio, 2003, s. 187–263). EU-oikeudellisessa oikeuskäytännössä oikeusvarmuuden periaatetta on sovellettu erityisesti vaatimuksena lainkäytön ja hallintotoiminnan ennakoitavuudesta (ks. asiat T-51/89; T-564/12, kohta 119). Tähän liittyen EU-kansalaisten tulee myös voida luottaa siihen, että heitä sitovat voimassa olevat lait ovat päteviä. Laajimmassa merkityksessään oikeusvarmuus merkitsee oikeuskäytännön mukaan sitä, että EU:n lainsäädännön tulee olla yksiselitteistä ja sen soveltamisen tulee olla ennustettavaa kaikille niille, jotka ovat sen alaisia (ks. esim. asiat 70/83; 212–217/80; 44/81; 325/85, kohta 18).

5. Johtopäätöksiä

Olen edellä tulkinnut, että oikeusvaltiolla ja oikeusvarmuudella on oikeusperiaatteina molemmilla sekä muodollinen että aineellinen ulottuvuutensa. Johtopäätöksenä voidaan todeta, että oikeuskirjallisuus-

Yleisemmältä kannalta tarkasteltuna oikeusvaltio-periaatetta koskeva oikeuskäytäntö kytkeytyy Montesquieun vallan kolmijako-oppiin.

nessa varsin yleisesti käytetty laaja oikeusvaltio-käsite (*thick rule of law*) johtaa siihen, että oikeusvaltiollisuuden osatekijänä oikeusvarmuudellakin tulee olla laaja tulkinta (*thick legal certainty*), mitä edellä esitetty kuvaus oikeusvarmuuden osaperiaatteista tukee. Oikeusvaltiollisuuden yhteys perus- ja ihmisoikeuksiin SEU 2 artiklassa perustelee osaltaan tätä oikeusvaltiollisuuden – mutta myös oikeusvarmuuden – laajentavaa tulkintaa. Käytännössä oikeusvaltio-periaate soveltuu usein argumentiksi tapauksiin, joissa on kyse tuomioistuimen riippumattomuudesta (ks. asiat C-64/16, kohdat 30, 36; Puolaa koskien, C-216/18, kohta 48; C-619/18, kohta 21). Yleisemmältä kannalta tarkasteltuna oikeusvaltio-periaatetta koskeva

oikeuskäytäntö kytkeytyy Montesquieun vallan kolmijako-oppiin (ks. esim. asia C-477/16, kohta 36).

Oikeusvarmuuden periaate eroaa EU-oikeudessa oikeusvaltio-periaatteesta siten, että sen soveltamisala on hieman tarkkarajaisempi. Oikeusvarmuus kytkeytyy oikeuskäytännössä oikeutettujen odotusten suojaan (*Vertrauensschutz*, ks. esim. asiat 289/81, kohta 21; T-571/93; C-17/03), taannehtivan lainsäädännön kieltoon (ks. esim. asia 98/78, kohdat 15, 20) ja muihin oikeusperiaatteisiin, joilla on oikeusvaltiollisuutta täsmällisempi soveltamisala. Voidaan myös todeta, että suhteellisuusperiaate tulee usein punnittavaksi suhteessa oikeusvarmuuteen (ks. esim. asia C-724/17). Laaja oikeusvarmuuden periaate (thick legal certainty) voidaan nähdä eräänlaisena käsitteellisenä liukumana oikeudellisen ratkaisutoiminnan ennakoitavuuden ja hyväksyttävyyden välillä. Toisin sanoen moderni käsitys eurooppalaisesta oikeusvaltiosta ja

oikeusvarmuudesta sen osana vaatii punnintaa ja tasapainoilua muodollisen ja aineellisen tulkinnan välillä (ks. Raitio, 2003, s. 387).

Kirjoittaja

Juha Raitio

OTT, VT Juha Raitio (s. 1967) on Helsingin yliopiston oikeustieteellisen tiedekunnan eurooppaoikeuden professori (2007-) ja varadekaani, jonka vastuualueena on yhteiskunnallinen vuorovaikutus, viestintä ja kestävään kehitykseen liittyvät kysymykset. Lisäksi hän toimii Helsingin yliopiston yliopistokollegion puheenjohtajana. Hän on kansainvälisesti tunnettu EU-oikeuden asiantuntija ja eurooppaoikeuden alan kansainvälisen kattojärjestö FIDE:n johtokunnan jäsen.



Lähteet

VIRALLISLÄHTEET

Euroopan unioni

Euroopan unionista tehdyn sopimuksen konsolidoitu toisinto, EUVL C 326, 26.10.2012, s. 13

Euroopan parlamentin ja neuvoston asetukset (EU, Euratom) 2020/2092, annettu 16 päivänä joulukuuta 2020, yleisestä ehdollisuusjärjestelmästä unionin talousarvion suojaamiseksi, EUVL, N:o L 4331, 22.12.2020, 1–10

Neuvoston asetukset (EY) N:o 168/2007, annettu 15 päivänä helmikuuta 2007, Euroopan unionin perusoikeusviraston perustamisesta, EUVL, N:o L 53, 22.2.2007, 1–14

European Parliament resolution of 25 October 2016 with recommendations to the Commission on the establishment of an EU mechanism on democracy, the rule of law and fundamental rights, 2015/2254 (INL).

FRA Opinion – 2/2016, Vienna, 8. April 2016, Opinion of the Fundamental Rights on the development of an integrated tool of objective fundamental rights indicators able to measure compliance with the shared values listed in Article 2 TEU based on existing sources of information

Komission tiedonanto Euroopan parlamentille ja neuvostolle, Uusi EU:n toimintakehys oikeusvaltioperiaatteen vahvistamiseksi, COM (2014) 158 final

Komission tiedonanto oikeusvaltion tilasta Euroopan unionissa, COM (2020) 580 final, 30.9.2020

Komission tiedonanto oikeusvaltion tilasta Euroopan unionissa, COM (2021) 700 final, 20.7.2021

Muut virallislähteet

Euroopan neuvoston Demokratiaa oikeusteitse -komissio (Venetsian komissio), Report on the Rule of Law, Adopted by the Venice Commission at its 86th plenary session, Venice 25–26 March 2011, Strasbourg, 4 April 2011, Study No. 512/2009, CDL-AD(2011)003rev

OIKEUSKÄYTÄNTÖ

Euroopan unionin tuomioistuin

Asia 14/68 Walt Wilhelm (1969) ECR 1

Asia 45/69 Boehringer (1970) ECR 769, s. 807

Asia 98/78 Racke, ECLI:EU:C:1979:14

Asia 138/79 Roquette Frères (1980) ECR 3333

Yhdistetyt asiat 212–217/80, Salumi, ECLI:EU:C:1981:270

Asia 44/81 Saksa v. komissio (1982) ECR 1855

Asia 289/81 Mavridis, ECLI:EU:C:1983:142

Asia 63/83 Kirk (1984) ECR 2689, s. 2718

Asia 70/83 Kloppenburg (1984) ECR 1075, s. 1086

Asia 143/83 komissio v. Tanska (1985) ECR 427, s. 435

Asia 294/83 "Les Verts" (1986) ECR 1339

Asia 100/84 komissio v. Yhdistyneet kuningaskunnat (1985) ECR 1169

Asia 137/85 Maizena (1987) ECR 4587, s. 4609

Asia 325/85 Irlanti v. komissio (1987) ECR 5041, s. 5088

Asia 432/85 Souna (1987) ECR 2229, s. 2247

Yhdistetyt asiat 46/87 ja 227/88, Hoechst, ECLI:EU:C:1989:337

Asia T-51/89 Tetra Pak Rausing (1990) I-362

Asia T-571/93 Lefebvre, ECLI:EU:T:1995:163

Asia T-81/95 Interhotel (1997) ECR II-1265

Asia T-105/95 WWF (1997) ECR II-313

Asia T-241/97 Stork Amsterdam (2000) ECR II-309

Asia C-496/99 P, CAS Succhi di Frutta, ECLI:EU:C:2004:236

Asia C-50/00 P, Unión de Pequeños Agricultores (2002) ECR I-6677

Asia C-428/02 Fonden Marselisborg (2005) ECR I-1527

Asia C-17/03 VEMW, ECLI:EU:C:2005:362

Asia C-110/03 Belgia v. komissio (2005) ECR I-2801

Asia T-337/03 Bertelli Gálves (2004) ECR II-1041

Yhdistetyt asiat C-402/05 P & C-415/05 P, Kadi ja Al Barakaat (2008) ECR I-6351

Asia C-161/06 Skoma-Lux (2007) ECR I-10841

Asia C-308/06 Intertanko (2008) ECR I-4057

Asia C-506/06 Mayr (2008) ECR I-1017

Asia C-279/09, DEB, ECLI:EU:C:2010:811

Asia C-529/09 komissio v. Espanja, ECLI:EU:C:2013:31

Asia C-617/10 ÅkerbergFransson, ECLI:EU:C:2013:280

Asia T-564/12 Ministry of Energy of Iran, ECLI:EU:T:2015:599

Asia C-64/16 Associação Sindical dos Juizes Portugueses v. Tribunal de Contas, ECLI:EU:C:2018:117

Asia C-477/16, Kovalkovas, ECLI:EU:C:2016:861

Asia C-452/16 PPU, Poltorak, ECLI:EU:C:2016:858

Asia C-724/17 Skanska, ECLI:EU:C:2019:204

Asia C-216/18 PPU, LM, ECLI:EU:C:2018:586

Asia C-619/18, komissio v Puola, ECLI:EU:C:2018:910

Asia C-619/18 R, komissio v Puola, ECLI:EU:C:2018:1021

Asia C-192/18 komissio v Puola, ECLI:EU:C:2019:924

Yhdistetyt asiat C-558/18 & C-563/18 Miasto Łowicz, ECLI:EU:C:2020:234

Asia C-791/19 komissio v Puola, ECLI:EU:C:2021:596

Asia C-55/20 Minister Sprawiedliwości, ECLI:EU:C:2022:6

Asia C-156/21 Unkari v parlamentti ja neuvosto, ECLI:EU:C:2022:97

Euroopan ihmisoikeustuomioistuin

Stafford v. Yhdistynyt kunin-gaskunta, tuomio 28.5.2002, no. 46295/99

KIRJAT

Aarnio, A. (1987). *The Rational as Reasonable, A Treatise on Legal Justification*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company.

Aarnio, A. (1989). *Laintulkinnan teoria, Yleisen oikeustieteen oppikirja*. Porvoo: Werner Söderström Osakeyhtiö.

Aarnio, A. (1997). *Reason and Authority, A Treatise on the Dynamic Paradigm of Legal Dogmatics*. Aldershot: Ashgate.

Bengoetxea, J. (1993). *The Legal Reasoning of the European Court of Justice, Towards a European Jurisprudence*. Oxford: Clarendon Press.

Broekman, J.M. (1999). *The Philosophy of European Union Law*. Leuven: Peeters.

Bugarič, B. (2016). Protecting Democracy inside the EU: On Article 7 TEU and the Hungarian

Turn to Authoritarianism.

Teoksessa C. Closa & D. Kochenov (toim.), *Reinforcing Rule of Law Oversight in the European Union* (s. 82–101). Cambridge: Cambridge University Press.

Fenwick, M., Siems, M. & Wrba, S. (2017). *The Shifting Meaning of Legal Certainty in Comparative and Transnational Law*. Oxford: Hart Publishing.

Grossot, X. (2006). *General Principles of Community Law*. Groningen: Europa Law Publishing.

Jyränki, A. (1978). *Presidentti, Tutkimus valtionpäämiehen asemasta Suomessa v. 1919–1976*. Suomalaisen Lakimiesyhdistyksen julkaisuja, A-sarja N:o 123. Vammala: Suomalainen Lakimiesyhdistys.

Jääskinen, N. (2007). *Euroopan unioni, oikeudelliset perusteet*. Helsinki: Talentum.

Nieminen, L. (2004) *Euroop-palaistuva valtiosääntöoikeus – valtiosääntöistyyvä Eurooppa*. Suomalaisen lakimiesyhdistyksen julkaisuja, A-sarja N:o 259. Helsinki: Suomalainen Lakimiesyhdistys.

Paunio, E. (2014). *Legal Certainty in Multilingual EU Law*. Surrey: Ashgate.

Pech, L. (2013). Promoting the rule of law abroad: on the EU's limited contribution to the shaping of an international understanding of the rule of law, teoksessa D. Kochenov & F. Amtenbrink (toim.), *EU's Shaping of the International Legal Order*, (s. 108–129). Cambridge: Cambridge University Press.

Peczenik, A. (1989). *On Law and Reason*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Raitio, J. (2003). *The Principle of Legal Certainty in EC Law*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Raulus, H. (2016). The Growing Role of the Union in Protection of Rule of Law. Teoksessa , F.A.N.J. Goudappel & E.M.H. Hirsch Ballin (toim.), *Democracy and Rule of Law in the European Union, Essays in Honour of Jaap W. de Zwaan* (s. 25–37). Haag: Asser Press.

Sájo, A. (1996). Rule by Law in East Central Europe. Teoksessa V. Gessner, A. Hoeland & C. Varga (toim.), *European Legal Cultures* (s. 471–473). Aldershot: Dartmouth.

Schermers, H.G. & Waelbroeck, D.F. (1992). *Judicial Protection in the European Union* (Fifth edition). Haag: Kluwer Law and Taxation Publishers.

Siltala, R. (2000). *A Theory of Precedent, From Analytical Positivism to a Post-Analytical Philosophy of Law*. Oxford: Hart Publishing.

Tuori, K. (2000). *Kriittinen oikeuspositivismi*. Vantaa: WSOY lakitieto.

Tuori, K. (2002a). *Critical Legal Positivism*. Aldershot: Ashgate.

Tuori, K. (2002b). *Foucault'n oikeus, Kirjoituksia oikeudesta ja sen tutkimisesta*. Vantaa: WSOY lakitieto.

Tuori, K. (2007). *Oikeuden ratio ja voluntas*, Helsinki: WSOYpro.

Von Bogdandy, A., Antpöhler, C. & Ioannidis, M. (2017). Protecting EU values, Reverse Solange and the Rule of Law Framework. Teoksessa A. Jacob & D. Kochenov (toim.), *The Enforcement of EU law and Values* (s. 218–233), Oxford: Oxford University Press.

Wróblewski, J. (1992). *The Judicial Application of Law*. Law and Philosophy Library, vol. 15. Toim. Z. Bankowski & N. MacCormick. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

ARTIKKELIT

Leppävirta, L. (2016). Onko oikeusvaltio-periaatteelle perustuvalla Euroopan unionilla toimivalta suojata oikeusvaltio-periaatetta? *Lakimies, 2016* (7–8), s. 1100–1121. Haettu osoitteesta <https://www.edilex.fi/lakimies/172270004.pdf>.

McCorquodale, R. (2016). Defining the International Rule of Law: Defying Gravity? *International & Comparative Law Quarterly, 65*(2), s. 277–304. <https://doi.org/10.1017/S0020589316000026>.

Raitio, J. (2014). Kontekstuaalisuus, Klamin finalismi ja EU-oikeus. *Lakimies, 2014* (4), s. 519–541. Haettu osoitteesta <https://www.edilex.fi/lakimies/136110001.pdf>.

Tuori, K. (2003). Om rättssäkerhet och sociala rättigheter (samt mycket annat). *Tidskrift för Rättsvitenskapen, 2003* (3), s. 341–365. <https://doi.org/10.18261/ISSN1504-3096-2003-03-01>.

Hirvonen, A. (2021). Oikeus käy aikaa tilassa: retki Euroopan oikeuden legitimizeettiin. *Lakimies, 2021* (3–4), 314–332. Haettu osoitteesta <https://www.edilex.fi/lakimies/233540002.pdf>.



#4

Muistijälkien kirjoittaminen aivojen kovalevyllä unen aikana takkuilee Alzheimerin taudissa

Heikki Tanila



Abstract

"Why do we need to sleep?" is still a question with no unambiguous answer. New findings from brain research suggest that one important function of sleep is to enable the transfer of temporary memories from deep brain structures to long-term storage in the cerebral cortex. This article describes from step to step how this process is thought to occur at the level of a single neuron and neural networks. The transfer of episodic memories from the hippocampus in the medial temporal lobe to the cerebral cortex explains a well-known paradox: an elderly person with Alzheimer's disease can remember even small details of decade-old events but fails to remember what happened only a few hours ago. Transfer of the memory engram particularly during sleep and typical sleep fragmentation at early stages of Alzheimer's disease can at least partly account for the poor memory of recent events. A better understanding of the underlying factors and mechanisms can help us develop new treatments to strengthen the weak parts in this chain of events and thereby enhance remembering of new events.

1. Johdanto

Yksi aivojen hämmästyttävimmistä ominaisuuksista on kyky napata jokin merkityksellinen ohikiitävä hetki elämästämme ja tallentaa se jonnekin muistilokeroihin yhtä sujuvasti kuin videokamera. Parhaimmillaan vielä vuosien tai jopa vuosikymmenten jälkeen se voidaan herätellä henkiin ja kokea kaikilla aisteilla ihan kuin se olisi juuri tapahtunut. Kertaus on opintojen äiti, näin on ajateltu myös oppimisen neurobiologiassa. Samojen asioiden, kuten vaikka nimen ja kasvojen, esiintyminen yhdessä toistamiseen johtaa siihen, että nämä kaksi erillistä asiaa yhdistyvät mielessä. Vastaavasti saman liikesarjan toistaminen satoja tai tuhansia kertoja saa pianistin sormet toistamaan herkästi ja virheettömästi pitkän ja vaativan juoksutuksen koskettimistolla. Varsin hyvin tunnetaan solu- ja molekyyli-tasolla mekanismeja, jotka hiovat hermosolujen viestintää toistuvissa tapahtumissa ja näin vähitellen muodostavat aivoihin hyvin pysyvän biologisen muistijäljen. Sen sijaan tapahtumamuistissa on kysymys siitä, että aivot tallentavat pitkän useiden aistien välityksellä koetun ainutlaatuisen tapahtumasarjan yhden ainoan toistokerran perusteella. Ja kaiken lisäksi tämä kertaluontoinen tallennettu muistijälki voi parhaassa tapauksessa säilyä mielessä koko loppuiän. Muistitutkijoita on vuosikymmenien ajan hämmästyttänyt se, miten tämä on ylipäänsä mahdollista.

2. Leikkaus vei muistin

Ratkaisevan tärkeä havainto tiettyjen aivojen osien keskeisestä merkityksestä tapahtumamuistin toiminnassa saatiin odottamatta yhden leikkauksen sivutuotteena 1950-luvun jälkipuoliskolla. Nuori mies, joka parhaiten tunnetaan nimikirjaimistaan H.M., oli pitkään sairastanut erittäin vaikeahoitoista epilepsiaa, joka ilmeni lähes päivittäin yleistyvänä kohtauksina, jotka invalidisoivat potilaan täysin. Mikään siihen aikaan käytössä olleista epilepsialääkkeistä ei estänyt toistuvia kohtauksia. Viimeisenä keinona neurokirurgit tarjosivat H.M:lle uudenlaista leikkausta, jossa poistettiin pieni

Leikkauksella oli kuitenkin myös yllättävä sivuvaikutus: potilas näytti täydellisesti menettäneen muistinsa.

viipale aivojen ohimolohkon sisäpinnalta molemmin puolin. Ajatuksena oli se, että tämän alueen tiedettiin lähettävän hermoyhteyksiä laajasti eri puolille aivoja, minkä ajateltiin edesauttavan aluksi paikallisen sähköpurkauksen leviämistä nopeasti koko aivoihin. Pitkän harkinnan

jälkeen päädyttiin leikkaukseen. Leikkaus onnistui teknisesti hyvin kokeneen kirurgin varmoissa käsissä. Potilaan toivuttua ilmeni myös, että hoitavien lääkäreiden ajatus oli ollut aivan oikea. Leikkauksen jälkeen yleistyneet kohtaukset harvenivat niin, että H.M. saattoi jatkaa entisen lääkityksen avulla jokseenkin epileptisistä kouristuskohtauksista vapaata elämää. Itse asiassa H.M. eli yli 80-vuotiaaksi. Leikkauksella oli kuitenkin myös yllättävä sivuvaikutus: potilas näytti täydellisesti menettäneen muistinsa (Tanila 1996). Hän ei leikkauksen jälkeen tuntenut hoitavaa lääkäriään, joka joutui kerta toisensa jälkeen esittäytymään kuin täysin tuntematon henkilö, vaikka oli varmasti H.M:n kanssa istunut monta kertaa pitkä tovit keskustelemassa leikkauksen hyödyistä ja riskeistä. H.M. myös eksyi toistuvasti uudessa ympäristössä eikä ikinä oppinut löytämään uutta reittiä.

Alue, joka H.M:ltä leikkauksessa poistettiin, käsitti suurimman osan hippokampuksesta, merihevosien pyrstön muotoisesta rakenteesta ohimolohkon sisäpinnalla, sekä sitä ympäröiviä aivokuoren osia sekä mantelitumakkeen eli amygdalan. Ajan tavan mukaisesti neurokirurgia piirsi leikkauksertomukseen hyvin tarkasti poistamansa alueen, mikä pystyttiin hyvin vahvistamaan kolmisenkymmentä vuotta myöhemmin aivojen magneettikuvauksella. Tieteellisesti tämä odottamaton leikkauksen haittavaikutus oli sensaatio: pienen aivokudoksen poisto johtaa hyvin dramaattiseen muistinmenetykseen. Oliko täällä siis se aivojen muistilokero?

H.M. ehti eläessään osallistua yli 40 v. ajan useampaan psykologiseen kokeeseen kuin kukaan muu ihminen tällä planee-

talla. Hän oli hyväntahtoinen ja mielellään lupautui kerta toisensa jälkeen mukaan näihin tutkimuksiin, osittain varmaan myös siksi, ettei hän muistanut sitä, kuinka rasittavia pitkät istunnot saattoivat ollakaan. Vähitellen näissä tutkimuksissa selvisi, että H.M:n muistiaukko oli itse asiassa paljon kapeampi kuin aluksi näytti. Yllättävintä oli se, että H.M. pystyi virheettömästi palauttamaan hyvinkin tarkkoja yksityiskohtia lapsuudestaan tai kouluvuosiltaan, mutta ei muistanut lainkaan, mitä tapahtui vain 5 minuuttia aiemmin. Tämä sama ristiriita on varmaan tuttu kaikille, joiden lähipiirissä on muistisairautta poteva vanhempi henkilö. Lapsuus ja sotavuodet ovat heillä kirkaana mielessä, mutta eilisestä ei tunnu olevan mitään muistikuvaa.

3. Hippokampus on tapahtumamuistin välitalennuspaikka

H.M:n tapaus laukaisi valtavan kiinnostuksen leikkauksessa poistettujen aivojen osion toiminnan ymmärtämiseksi. Kesti kuitenkin 25 vuotta ennen kuin H.M:n kaltainen valikoiva muistin menetys pystyttiin tuottamaan kokeellisilla leikkauksilla koe-eläimille. Havaintoja täydennettiin neurotoksiineilla, joka pystyvät valikoivasti tuhoamaan hermosolut paikallisesti ilman, että alueen läpi kulkevat hermosäikeet vaurioituvat. Näin saatiin lopulta rajattua hippokampus tapahtumamuistin kannalta keskeiseksi aivorakenteeksi, joka on välttämätön esimerkiksi kuljetun reitin muistintalennuksessa. Muillakin H.M:ltä poiste-

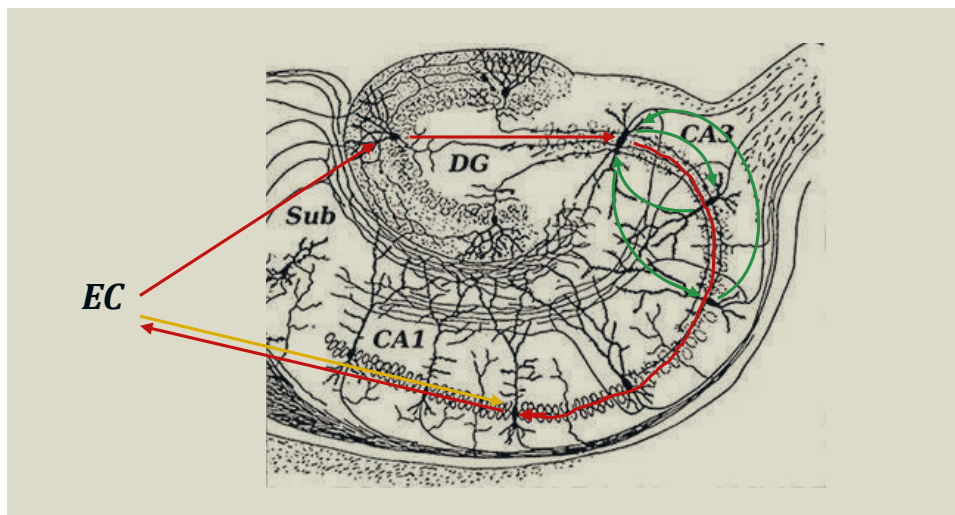
tuilla aivorakenteilla osoittautui olevan merkitystä muistille, mutta erilaisissa muistitoiminoissa. Erilaisilla huolellisesti kontrolloiduilla koeasetelmilla pystyttiin osoittamaan, että hippokampuksen merkitys esimerkiksi paikkamuistissa on ajallisesti rajallinen. Sen poistaminen tai toiminnallinen lamaaminen rotalla ei vaikuttanut jo noin viikko aiemmin opitun paikan muistamiseen, mutta esti uuden oppimisen tai edellisenä päivänä opitun muistamisen. Tästä pääteltiin, että hippokampuksen täytyy olla jonkinlainen väliaikainen muistivarasto, jolla on vain rajallinen kapasiteetti. Jotta hippokampukseen tallentunut tuore kokemus voisi säilyä muistissa vuosien ajan, se on siirrettävä säilömuistiin aivokuorelle, jonka teoreettinen säilytystila on lähes rajaton. Muistin väliaikainen tallentuminen hippokampukseen selittää hyvin sen, että ohimolohkon sisäosia vaurioittavat sairaudet, kuten Alzheimerin tauti, vaikuttaa ensisijaisesti vain hippokampuksesta riippuvaisiin muistijälkiin, siis lähiaikoina tallentuneisiin, kun taas vanhat muistot ovat jo ehtineet iskostua aivokuorelle.

4. Hippokampus on märehijä

Hippokampuksen erityistehtävä tapahtumien tallentaja voidaan pitkälle selittää sen hienorakenteen perusteella. Eri aisteista saatava tieto saapuu hippokampukseen ohimolohkon sisäpinnalla olevan entorinaalisen aivokuoren kautta. Oleellista on se, että tieto saapuu kahta eri reittiä, joko pitempää hammaspoimu (DG) – CA3 – CA1 ketjua pitkin tai suoraan CA1 alueelle

(Kuva 1). Näin ollen CA1 alueen pyramidisoluilla on samanaikaisesti tietoa siitä, mitä tapahtuu nyt ja mitä tapahtui hetki (noin 30 ms) sitten. Arvellaan, että juuri tällainen tyypillinen viivepiiri mahdollistaa tapahtumaketjun havaitsemisen ja tallentamisen muistiin. Lisäksi informaation sisältö eroaa huomattavasti DG:n ja CA3:n tasolla. Kukin DG:n hermosolu saa tietoa vain yhdeltä entorinaalisen aivokuoren solulta, jolloin jokainen näitä hermosoluja aktivoiva havainto voi tallentua ainutlaatuisena. Ketjussa seuraava CA3 alue toimii juuri päinvastoin. Tämän alueen hermosolut saavat 90 %:sti tietoa toisilta CA3 alueen soluilta. Tämä luonnollinen rakenne on täsmälleen sama kuin synteettisissä hermo verkoissa oleva autoassosiatiivinen kerros. Tässä kerroksessa kiertävä informaatio auttaa sirpaleisen, vain osittain tallentuneen havainnon täydentymistä aiemmilla muistikuvilla.

Keskeinen hippokampuksen toiminnallinen piirre on sen toiminnan vaihteellisuus. Hippokampus on kuin 2-tahtinen moottori. Kun eläin on aktiivinen ja liikkeellä tai jos se on vilkeudessa (REM), kaikki tämän aivorakenteen hermosolut värähtelevät jrsijöillä 7-8 Hz ns. theta-rytmissä. Kun taas eläin on liikkumattomana hereillä tai hidasaaltouudessa (NREM), alueen sähköinen toiminta on tyypillisesti epäsäännöllistä, mutta siinä on isoja jännitevaihteluita. Tämän epäsäännöllisen toiminnan lomassa havaitaan kuitenkin CA1 alueella paikallisesti 50-500 ms kestäviä säännöllisiä 150-250 Hz värähteitä (ihmisellä 100-140 Hz). Tämän kaksitahtisuuden perusteella maailman johtava hippokampuksen sähköisen toiminnan tutkija, unkarilais-amerikkalainen György Buzsáki (1989) kehitti 1980-luvun puolivälissä edelleen pätevänä pidetyn



Kuva 1. Informaation kulku hippokampuksen hermostopiireissä. Entorinaaliselta aivokuorelta (EC) tulee ns. lävistäjärata hippokampuksen hammaspoimun (DG) jyväissoluihin, joista viesti lähtee eteenpäin CA3-alueen pyramidisoluille. Nämä lähettävät viestin edelleen CA1-alueen pyramidisoluille, jotka palauttavat viestiketjun EC:lle (punaiset nuolet). EC:ltä lähtee CA1-alueen soluille myös suora ratayhteys (oranssi nuoli), jolloin yksittäinen CA1 pyramidisolu saa tietoa samanaikaisesti siitä, mitä aistitietoa EC:lle on tullut kahdessa eri aikapisteessä. Näiden suorien ratayhteyksien lisäksi CA3-alueella on lukemattomia paikallisia silmukoita tämän alueen pyramidisolujen kesken (vihreät nuolet). (Mukailtu S. Ramon y Cajalin klassisen piirroksen pohjalta).

teorian kaksivaiheisesti muistijäljen tallentumisesta hippokampuksessa. Theta-toiminnan aikana hippokampus lukee aistitietoa ulkomaailmasta, kun taas epäsäännöllisen sähköisen toiminnan aikana se kertaa välimuistissa olevaa tietoa erityisesti CA3-alueiden silmukoiden avulla. Tämä jo talletetun tiedon kierrättäminen, 'märehtiminen', mahdollistaa teoriassa sen, että yksittäinen ainutkertainen tapahtuma itseasiassa pystytään lukemaan muistiin lukemattomia kertoja. Teoria on kiehtova, mutta onko vuosien saatossa löydetty mitään konkreettisia teорияa tukevia havaintoja?

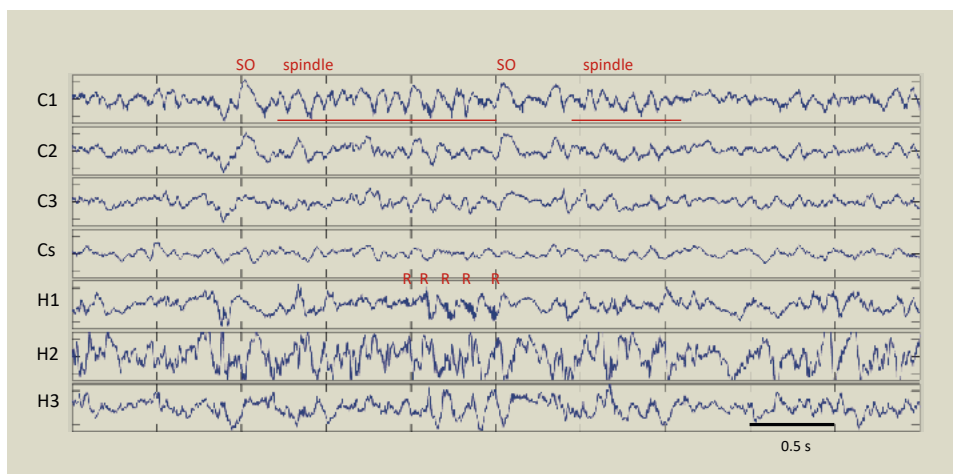
Jo 1970-luvulla fysiologian ja lääketieteen Nobelin v. 2014 saanut amerikkalais-

englantilainen John O'Keefe huomasi, että rotan hippokampuksen yksittäiset hermosolut näyttivät olevan aktiivisia vain kuin eläin oli tutkimusympäristön tietyssä osassa. Iso joukko näitä 'paikkasoluja' muodostaa ikään kuin sisäisen kartan kustakin ympäristöstä (Eichenbaum 1999). Myöhemmin näitä paikkasoluja on löydetty myös ihmisiltä epilepsiapotilaissa tehtyjen hippokampusmittausten yhteydessä. Kun eläin liikkuu kapeaa kujaa pitkin, näiden paikkasolujen toiminnalliset kentät asettuvat väkisinkin jonoksi (Kuva 2A). Toisin sanoen rotan edetessä kujaa pitkin yhteen suuntaan siinä ympäristössä aktiiviset hippokampuksen hermosolut laukeavat aina peräkkäin samassa järjestyk-

5. Muistijäljen siirtyminen hippokampuksesta aivokuorelle unen aikana

Tällainen lyhyiden tapahtumien kertausksettien esiintyminen unen aikana herätti tutkijat miettimään, voisiko sama mekanismi liittyä myös hypoteettiseen muistitiedon siirtoon hippokampuksesta aivokuorelle. Lukuisissa koeasetelmissa on osoitettu, että intensiivinen oppittelujakso välittömästi seuraavan torkahduksen aikana ei tapahdu opitun aineksen unohtamista vaan pikemminkin suoritus paranee. Toisien sanoen unijakson jälkeen tehdyssä testissä koehenkilöt suoriutuvat paremmin kuin välittömästi oppimistapahtuman perään tehdyssä testissä. Mielenkiintoista kyllä, tämä ilmiö tulee kaikkein selvimmän esiin yksinkertaisten liikesarjojen oppelussa, joissa hippokampusta ei lainkaan tarvita, mutta se nähdään myös tyypillisessä hippokampuksesta riippuvaisessa suunnistustehtävässä. Tämä muistin vahvistuminen unen aikana voi toki selittyä myös hippokampuksen sisällä tapahtuvassa tapahtumaketjujen kertaamisessa unen aikana. Toisaalta voitiin osoittaa, että opitun sokkelossa suoritetun muistitehtävän aikana hippokampuksessa nähdään selkeä glukoosimetabolian lisääntyminen 5 vrk oppimistapahtuman jälkeen, mutta ei enää 25 vrk jälkeen oppimistapahtumasta (Bontempi 1999). Sen sijaan aivokuoren etuosissa muistitehtävän aikainen aktivoituminen voimistui selvästi myöhemmässä aikapisteessä. Ikään kuin muistijälki olisi siirtynyt tällä aikavälillä hippokampuksesta aivokuorelle.

Jälleen kerran törmättiin ongelmaan, joka soti kaikkea biologisen muistijäljen synnystä kertynyttä tietoa vastaan. Vaikka yksittäiset tapahtumat voitaisiin koodata enintään 0.5 s kestäviksi paketeiksi hippokampuksessa, miten ne voisivat siirtyä aivoissa pakettina paikasta toiseen ja kertalukemalla tallentua toisen aivoalueen hermoverkkoihin. Taas parhaaksi selitykseksi tarjoutuivat aivorytmit. Kaikkien nisäkkäisen hidasaaltounelle tyypillisiä ilmiöitä aivosähkökäyrässä ovat < 1 Hz taajuudella esiintyvät yksittäiset hitaat aallot sekä 10-15 Hz taajuudella esiintyvät 0.5-2 s kestävät säännölliset unisukkulat. Hitaiden aaltojen keskellä aivokuoren hermosolujen toiminta vaimenee, kun taas aallon loppuvaiheessa niiden ärtyvyys lisääntyy perustason yläpuolelle. Unisukkulat ajoittuvat yleensä juuri tähän myöhäiseen vaiheeseen. Aivokuoren hitaiden aaltojen ajatellaan olevan puhtaasti aivokuorelta lähtöisin, kun taas unisukkulat syntyvät aivokuoren ja sen vireystilaa säätelevän talamuksen välisessä silmukassa. Lukuisat havainnot unenaikaisissa sähköisissä mittauksissa rotilla ja hiirillä ovat osoittaneet, että aivokuoren hidasaallot ja unisukkulat ovat myös ajallisesti kytkeytyneet hippokampuksen nopeisiin väreisiin (Kuva 3). Nykyisin vallitsevan saksalaisten Matthias Möllen ja Jan Bornin teorian (Mölle & Born, 2011) mukaan näiden kolmen värähtelyn kytkeytyminen toisiinsa hetkellisesti mutta toistuvasti unen aikana luo edellytykset sille, että hippokampuksesta voidaan kontrolloidusti siirtää näitä lyhyitä informaatiopaketteja aivokuoren etuosiin, jonne CA1 alueella on suorat ratayhteydet. On selvää, että tällainen sveitsiläisen kellon tarkkuudella toimiva hieno mekanismi on myös herkkä kaikenlaisille häiriöille, joita eri aivosairaudet tai



Kuva 3. Hiiren aivokuoren ja hippokampuksen sähköisen toiminnan mittaus 3-kärkisillä elektrodeilla hidasaaltouen aikana. Aivokuoren sisäisellä kanavalla (C1) nähdään kaksi selvää hidasaaltoa (SO) sekä niitä seuraavat unisukkulat (punainen viiva). Pitemmän ensimmäisen unisukkulan loppuvaiheessa nähdään hippokampuksen CA1-alueen kanavalla (H1) useita lyhyitä värkeitä, jotka ajallisesti myötäilevät aivokuoren unisukkulan jännitevaihteluita. Cs = perinteinen kalloruuvielektrodikanava, jossa ei nähdä hidasaaltoja eikä unisukkuloita.

aivosolujen toimintaa häiritsevät lääkkeaineet tai päihitteet voivat aiheuttaa.

6. Unen häiriöt ja muistin heikentyminen Alzheimerin taudissa

Yksi varhaisimmista Alzheimerin taudin (AT) oireista on yöunen häiriytyminen. Tämä ei tarkoita ainoastaan unessa vietetyn ajan lyhenemistä vaan myös unen sisäisen rakenteen muutosta. Unijaksoista tulee lyhyempiä ja erityisesti syvän hidasaaltouen määrä suhteellisesti vähenee. On osoitettu, että hidasaaltouen lyheneminen on suoraan yhteydessä

tautiprosessissa keskeisen aivokuoren etuosaan kertyneen beeta-amyloidin määrään ja heikentyneeseen tuoreen muistiaineksen vahvistumiseen unen aikana (Mander 2015). Tämä sopii hyvin yhteen AT:lle tyypillisen varhaisoireeseen, vaikeuteen painaa pysyvästi mieleen viimeaikaisia tapahtumia, vaikka yksittäinen yksityiskohta saattaisikin vielä tallentua ja vanhat muistot ovat vielä kristallinkirkkaita. Käynnissä olevissa tutkimuksissamme olemme kiinnostuneet AT:ssa esiintyvistä unen aikaisten aivorytmien muutoksista ja siitä, voisivatko ne selittää osittain tapahtumamuistin varhaisen heikkenemisen.

Käytämme tutkimuksissa AT:ia mallintavia siirtogeenisiä APP/PS1 hiiriä, joiden perimään on istutettu AT:n harvinaista perinnöllistä muotoa aiheuttavat geenit. Hiirille kehittyä varhaisaikuu-

suudessa täysin ihmisen taudin kaltaisia amyloidiplakkeja pääasiassa aivokuorelle ja hippokampukseen, ja kuten ihmisen taudissakin, muistin heikkeneminen tulee ilmeiseksi vasta kun amyloidikertymien nopein kasvu on jo tasoittunut, mikä hiirillä tapahtuu niiden keski-ikää vastavassa 1 v. iässä. Tyypillisesti muistioire ilmenee hiirillä selvimmin hippokampuksen toiminnasta riippuvaisessa paikkaoppimistehtävässä. Olemme hiljattain osoittaneet, että siirtogeenisillä hiirillä hippokampuksen nopeiden väreiden ja aivokuoren hidasaaltoja seuraavien unisukkuloiden kytkeytyminen unen aikana on heikentynyt villityypin

sisaruksiin verrattuna (Zhurakovskaya 2019). Ei kuitenkaan tiedetä, heijastuvatko nämä muutokset suoraan oppimiseen ja muistiin. Toisaalta on osoitettu, että onnistuneen oppimistapahtuman jäljessä unijaksossa, varsinkin sen alussa,

esiintyy tavallista unijaksoa enemmän hippokampuksen nopeita väreitä (Eschenko 2008). Toisaalta ei tiedetä, väheneekö oppimistapahtuman väreitä lisäävä vaikutus AT:ssa tai tautia mallintavilla hiirillä. Näitä asioita selvittelemme käynnissä olevassa tutkimussarjassamme.

Unen rakenteen ja sen aikaisen muistijäljen siirtymisen taustalla olevien aivorytmien epäsynkronian lisäksi unen aikaista muistin jälkeen siirtymistä hippokampuksesta aivokuorelle voi AT-potilailla haitata hippokampuksen ylimääräinen sähköinen toiminta. Nimittäin pitkään on tiedetty, että epileptisten kouristusko-

tausten määrä on selvästi suurempi AT-potilailla kuin ikäverrokeilla. Toisaalta epileptiset kouristuskohtaukset ovat kaiken kaikkiaan hyvin harvinaisia tapahtumia. Sen sijaan tuoreet tutkimukset ovat paljastaneet, että jopa noin 40 % varhaista AT:ia sairastavilla esiintyy yksittäisiä epileptisiä piikkiäpurkauksia, joista henkilö itse ei ole tietoinen (Vossell 2016). Nämä ovat vuosikausia jääneet huomaamatta, sillä ne esiintyvät lähes yksinomaan unen ja erityisesti hidasaaltouuden aikana, kun tähän saakka kaikki EEG-tutkimukset AT-potilailla on tehty päivällä poliklinikakäynnin yhteydessä.

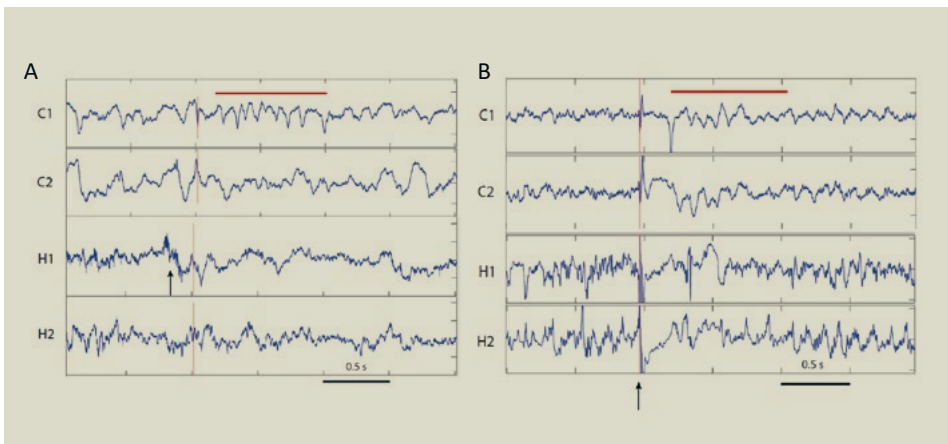
Yksi varhaisimmista Alzheimerin taudin oireista on yönen häiriintyminen.

Hyvin heikolla sähköärsykkeellä hippokampukseen aiheutettu epileptistä piikkiäpurkausta jäljittelevä aktivaatio rotalla oppimista seuraavan unijakson aikana vähentää nopeiden hippokampusväreiden määrää ja heikentää paikkamuistia (Gelinas 2015). On myös mahdollista, että tällaiset ylimääräiset sähköpurkaukset voivat sotkea hippokampuksen ja aivokuoren keskustelua unen aikana sekoittamalla vuoropuhelulle välttämättömien rytmien synkroniaa. Toinen muistin tallentumisen kannalta vielä haitallisempi vaihtoehto on se, että satunnainen hippokampuksen häiriöpiikki kytkeytyy aivokuoren hidasa-

aaltoon ja unisukkulaan nopean hippokampusväreen tavoin, mutta ilman mielekästä informaationvälitystä. Tällöin voisi syntyä satunnaisia vääriä muistijälkiä. Omat alustavat tuloksemme osoittavat, että tällainen satunnainen kytkeytyminen on todella mahdollista. Nimittäin AT:n kaikilla tavallisimmilla siirtogeenisillä hiirimalleilla esiintyy myös epilepsiaa ja aivan samoin kuin AT-potilailla, niillä esiintyy yksittäisiä piikki-purkauksia unen aikana (Kuva 4). Tarkoituksemme on selvittää, onko näillä piikki-purkauksilla suoraa haitallista vaikutusta tuoreen oppimistapahtuman muistamisessa.

Käynnistämme juuri laajaa tutkimus-sarjaa, jossa AT:ia mallintaville APP/PS1 hiirille tai niiden villityypin sisarille implantoidaan monikärkiset mikroelektrodit hippokampukseen ja aivokuorelle ja koulutetaan ne suorittamaan yksinkertaisia paikkamuistitehtäviä, jotka ne pystyvät tehtävän periaatteen opittuaan oppimaan

muutamalla suorituskerralla. Oppimista-pahtuman jälkeen hiiret saavat rauhassa nukkua kotihäkissään 3 h ajan video-EEG seurannassa, minkä jälkeen testaamme, kuinka hyvin ne muistavan ennen unijak-soa oppimansa tehtävän. Koeasetelman mahdollistaa unijakson rakenteen ja mahdollisten piikki-purkausten määrän korreloinnin kyseisen päivän muistisuori-tuksen kanssa. Odotamme, että kullakin hiirellä muistisuoritus vaihtelee päivästä toiseen. Tutkimus antaa tietoa AT:n kaltaisten aivomuutosten vaikutuksesta unen rakenteeseen ja sen yhteydestä tuoreen muistijäljen tallentumiseen aivokuorelle unen aikana. Hiiritöiden rinnalla mittaamme varhaista AT:ia ja muistiongelmia potevien henkilöiden uni-EEG:tä kotona tapahtuvien mittauksin, jolloin yönun laatu on parempi ja totuudenmukaisempi kuin unipoliklini-kalla tapahtuvassa mittauksessa.



Kuva 4. (A) Normaali tilanne. Hippokampuksen nopea väre (nuoli) ajoittuu päällekkäin aivokuoren hitaan aallon (päättyy punaiseen pystyviivaan) kanssa, jota seuraa unisukkula (punainen vaakaviiva). (B) Patologinen tilanne. Hippokampuksesta lähtevä ja aivokuorelle leviävä epileptinen piikki-purkaus (nuoli) virittää aivokuorelle pienen purkauspiikin ja unisukkulan (punainen vaakaviiva). C1-2 frontaalisen aivokuoren kanavia, H1-2 hippokampuksen kanavia.

7. Tutkimuksen tulevaisuuden näkymiä

Mitä hyötyä tällaisesta tutkimuksesta on odotettavissa akateemisen mielenkiinnon lisäksi? Ensinnäkin tutkimus auttaa tunnistamaan ne unen elementit, jotka ovat kaikkein tärkeimpiä unen aikana tapahtuvalla muistijäljen vahvistumiselle ja toisaalta, kuinka ne muuttuvat tavallisimmassa muistisairaudessa. Tämän tiedon pohjalta voidaan yrittää korjata yöunen rakennetta. On osoitettu, että häiriintynyttä unen rakennetta voidaan korjata jossain määrin erilaisilla kajoamattomilla ärsytysmenetelmillä. Yhdessä tutkimuksessa unenaikainen kevyt pään pinnalle annettu hitaasti aaltoileva tasavirtaärsytys lisäsi varhaisvaiheen AT:ia sairastavien unen hidasaaltounen ja unisukkuloiden määrää ja paransi muistisuoritusta joissain tehtävissä (Ladenbauer 2017). Toisaalta pelkkä lyhyt äänipulssi, kun se ajoitetaan mitatun aivokuoren hidasaallon kanssa, lisää hidasaaltojen ja unisukkuloiden kytkeytymistä ja parantaa niin ikään suoriutumista joissain muistitehtävissä

(Ngo 2013). Tuoreissa omissa tutkimuksissamme havaitsimme, että nykyisin käytössä olevalla epilepsialääkkeellä voidaan löytää ainakin hiirillä annos, joka lähes kokonaan poistaa yöunen aikaiset epileptiset piikkiäurkaukset vaikuttamatta itse unen rakenteeseen. Jos pystymme osoittamaan, että tämä hoito myös vähentää virheiden määrää yöunen jälkeisessä muistitehtävässä, hoitomuoto voi nopeastikin levitä potilaskäyttöön.

Hyvä unen laatu on pitkään ollut arvostettu terveyttä edistävä tekijä ja toisaalta unihäiriöt voivat pahimmillaan tehdä ihmisen toimintakyvyttömäksi. Tähän asti lääketiede on uniapnean hoitoa lukuun ottamatta pystynyt lähinnä tarjoamaan uniongelmaisille vain nukahtamista helpottavia lääkkeitä, joista useimmat sopivat huonosti pitkäaikaiseen käyttöön. Olemme lähestymässä uutta aikakautta, jossa unen määrän sijasta ryhdytään selvittämään unen rakennetta ja pyritään sitä tarvittaessa hienovaraisesti korjaamaan, ei unen itsensä vuoksi vaan unen tuoman paremman päiväaikaisen toimintakyvyn saavuttamiseksi. Unen vaikutus muistiin on tässä yksi tärkeä osa-alue.

Kirjoittaja

Heikki Tanila

Heikki Tanila, LT, Translationaalisen neurotieteen professori Itä-Suomen yliopiston A. I. Virtanen -instituutista on yli 35 vuoden ajan tutkinut aivojen muistimekanismeja sekä vanhenemiseen ja aivosairauksiin liittyvää muistin heikkenemistä. Hänen tutkimuksensa pääpaino on tällä hetkellä selvittää varhaisen Alzheimerin taudin solutason muutosten yhteyttä lähimuistin heikkenemiseen käyttäen apuna siirtogeenisiä Alzheimerin taudin hiirimalleja.



Kirjallisuus

Bontempi, B., Laurent-Demir, C., Destrade, C., & Jaffard, R. (1999). Time-dependent reorganization of brain circuitry underlying long-term memory storage. *Nature*, 400 (6745), 671-5. doi: 10.1038/23270.

Buzsáki, G. (1989). Two-stage model of memory trace formation: a role for "noisy" brain states. *Neuroscience*, 31(3), 551-70. doi: 10.1016/0306-4522(89)90423-5.

Eichenbaum, H., Dudchenko, P., Wood, E., Shapiro, M., & Tanila, H. (1999). The hippocampus, memory, and place cells: is it spatial memory or a memory space? *Neuron*, 23(2), 209-26. doi: 10.1016/s0896-6273(00)80773-4.

Eschenko, O., Ramadan, W., Mölle, M., Born, J., & Sara, S.J. (2008). Sustained increase in hippocampal sharp-wave ripple activity during slow-wave sleep after learning. *Learn. Mem.*, 15(4), 222-8. doi: 10.1101/lm.726008.

Gelinas, J.N., Khodagholy, D., Theisen, T., Devinsky, O., & Buzsáki, G. (2016). Interictal epileptiform discharges induce hippocampal-cortical coupling in temporal lobe epilepsy. *Nature Med.*, 22(6), 641-8. doi: 10.1038/nm.4084.

Ladenbauer, J., Külzow, N., de Boor, R., Avramova, E., Grittner, U., & Flöel, A. (2017). Promoting Sleep Oscillations and Their Functional Coupling by Transcranial Stimulation Enhances Memory Consolidation in Mild Cognitive Impairment. *J. Neurosci.*, 37(30), 7111-7124. doi: 10.1523/JNEUROSCI.0260-17.2017.

Mander, B.A., Marks, S.M., Vogel, J.W., Rao, V., Lu, B., Saletin, J.M., Ancoli-Israel, S., Jagust, W.J., & Walker, M.P. (2015). β -amyloid disrupts human NREM slow waves and related hippocampus-dependent memory consolidation. *Nature Neurosci.*, 18(7), 1051-7. doi: 10.1038/nn.4035.

Mölle, M. & Born J. (2011). Slow oscillations orchestrating fast oscillations and memory consolidation. *Prog. Brain Res.*, 193, 93-110. doi: 10.1016/B978-0-444-53839-0.00007-7.

Ngo, H.V., Martinetz, T., Born, J., & Mölle, M. (2013). Auditory closed-loop stimulation of the sleep slow oscillation enhances memory. *Neuron*, 78(3), 545-53. doi: 10.1016/j.neuron.2013.03.006.

Tanila, H. (1996). Leikkaus, joka vei muistin, *Duodecim*, 112(17), 1553-7.

Vossel, K.A., Ranasinghe, K.G., Beagle, A.J., Mizuiru, D., Honma, S.M., Dowling, A.F., Darwish, S.M., Van Berlo, V., Barnes, D.E., Mantle, M., Karydas, A.M., Coppola, G., Roberson, E.D., Miller, B.L., Garcia, P.A., Kirsch, H.E., Mucke, L., & Nagarajan, S.S. (2016). Incidence and impact of subclinical epileptiform activity in Alzheimer's disease. *Ann. Neurol.*, 80(6), 858-870. doi: 10.1002/ana.24794.

Zhurakovskaya, E., Ishchenko, I., Gureviciene, I., Aliev, R., Gröhn, O., & Tanila, H. (2019). Impaired hippocampal-cortical coupling but preserved local synchrony during sleep in APP/PS1 mice modeling Alzheimer's disease. *Sci Rep.*, 9(1), 5380. doi: 10.1038/s41598-019-41851-5.





#5

Miten pyhä teksti toimii?

Jutta Jokiranta



Abstract

Religious institutions and faith communities should recognize and acknowledge the nature of sacred texts as constantly changing and renewing resources, and societies should recognize and acknowledge human ways of committing to sacred texts and their claims. We call for an understanding of the processes by which certain texts became and become to be distinguished as special or sacred and of the consequences of such commitments. This article explores Jewish/Judean manuscript culture at the turn of the era when ideas of sacred texts started to be formed; this offers possibilities of reflection of modern processes. Sacred texts are not only conceptualized as divine speech or divinely inspired writings. Our investigation offers three areas of study needed to analyse the functioning of sacred texts in the past and the present: the material mediation of texts, the role of the community and its ritual life, and changes in content and interpretation.

1. Johdanto

Raamatunkäytön ja -tulkinnan on todettu olevan yhä yhteiskunnallisesti merkittävä kysymys. Pyhän tekstin käyttäjät voivat vedota tekstin auktoriteettiin ja vakiintuneeseen asemaan uskonnollisessa yhteisössä ja haluta alistaa sille myös itsensä. Ongelmaksi tämä koetaan, kun tekstit sisältävät syrjiviä asenteita esimerkiksi naisia, seksuaalivähemmistöjä tai etnisiä ryhmiä kohtaan tai jos tuomionjulistukset siirretään kovin suorasukaisesti johonkin nykyajan tilanteeseen tai lopunajan ennustamiseen. Vaikka joillakin teksteillä on merkittävä opillinen ja historiallisesti muotoutunut asemansa, uskonnolliset yhteisöt eivät näe oikein rooliaan yhteiskunnassa, jos ne eivät samalla tunnusta pyhien tekstien luonnetta alati muuttuvina ja uusiutuvina resursseina ja käy jatkuvaa keskustelua ja rajanvetoa niiden tulkinnasta historiallisesti ja nykyajassa. Toisaalta yhteiskunnallisessa keskustelussa ei päästä eteenpäin, jos ei tunneta ja tunnusteta niitä prosesseja, joilla ihmiset sitoutuvat tiettyjen tekstien arvoaltaan. Mitä annettavaa raamatuntutkimuksella on

tähän tilanteeseen? Ammennan tässä artikkelissa Vanhan testamentin ja Qumranin tekstien tutkimuksesta sekä hiukan myös kognitiivisesta tutkimuksesta vastatakseni kysymykseen, miten pyhä teksti toimii. Millä tavoin tekstejä lähestyttiin ja erotettiin erityisiksi ajanlaskun alun tienoilla? Mitä pitää ymmärtää, jotta ymmärrämme miksi Raamattu puhuu yhdelle yhtä ja toiselle toista?¹

2. Mikä on pyhä teksti?

Tärkeämpää kuin selvittää pyhä-sanan etymologia, on katsoa miten pyhä-sana käytetään, mitä sillä ”koodataan”, niin kuin Veikko Anttonen (2010) asian ilmaisee. Joitakin asioita on kaikissa kulttuureissa, uskonnosta riippumatta, erotettu ja pidetty erityisinä, joko erityisen arvokkaina tai jollakin tavalla vaarallisina, ja näin luotu yhteisiä arvoja ja käytänteitä. Esimerkiksi suomalaisten nykyistä mielenmaisemaa avaa tutkimus, jossa suomalaisilta kysyttiin mikä heille on pyhää. Suuri enemmistö liitti pyhyiden rakkauteen ja läheisiin

Raamatunkäytön ja -tulkinnan on todettu olevan yhä yhteiskunnallisesti merkittävä kysymys.

1 Painopisteeni on juutalais-kristillisen perinteen pyhillä teksteillä, mutta tämän perinteen raamatut (muun muassa heprealainen Raamattu, Vanha testamentti, Uusi testamentti ja niiden erilaiset kokoonpanot) on myös asetettava vertailevaan pyhien tekstien viitekehykseen, ks. Jokiranta & Nikki 2021, 11–36. Raamattu on pitkälti määritellyt pyhien tekstien ymmärtämistä, jolloin pyhän tekstin luonne on otettu annettuna kristillisestä kontekstista käsin, eikä tällöin tunnusteta, mikä Raamatussa on erityistä ja mikä yleistä.

ihmisiin sekä rauhaan, lepoon ja omaan kotiin. Tällöin pyhä on rinnastettavissa johonkin varjeltavaan, suojeltuun, koskemattomaan: ”Pyhä on raja, joka erottaa erilleen asiat, joista ei haluta tai koeta voitavan neuvotella” (Pessi et al. 2018, 7).

Heprean adjektiivia *qados*, ”pyhä”, tai substantiivina *qodes*, ”pyhyys”, ei liitetä kirjoitettuihin *teksteihin* vielä Heprealaisessa Raamatussa. Heprealaisen Raamatun kirjoittajat pitivät pyhänä Jumalaa ja Jumalalle erotettuja ihmisiä ja asioita, mutta kirjoitetut tekstit eivät vielä suoraan kuuluneet näihin asioihin.² Nykyäänkin tekstikokoelman ainutlaatuisuutta puolustetaan usein muilla sanavalinnoilla kuin niiden pyhyydellä: Raamattu on ”Jumalan sanaa” tai joku on oikealla tavalla ”raamatullinen”. Pyhyyden sijaan diskurssi nojaa usein tekstin jumalallisuuteen, ilmoituskäsitykseen, joka harvalle nykyään tarkoittaa suoraa sanainspiraatio-oppia, mutta monelle kuitenkin – luterilaisittain ilmaistuna – Jumalan ”erityistä ilmoitusta”. Tällainen puhetapa luonnollisesti hämärtaa Jumalan sanan välitteisyyttä.

2 Jeremia viittaa Herran ”pyhiin sanoihin”: hän on niiden vuoksi kuin juopunut, kun hänen täytyy saarnata vääriä profeettoja vastaan (Jer. 23:9). Jumalan lisäksi Jumalalle erotetut ihmiset, Jumalan oma kansa, olivat pyhitettyjä (3. Moos. 20:26; 5. Moos. 14:2). Kreikankielisessä maailmassa myös kirjoituksia saatettiin luonnehtia pyhiksi (Room. 1:2; 2. Tim. 3:15; Weissenberg von & Uusimäki 2017; Weissenberg von & Seppänen 2015). Uudessa testamentissa viitataan profeettalliseen sanaan ja Jumalan Hengen vaikutukseen kirjoitusten synnyssä (esim. Room. 15:4; 2. Tim 3:16; 2. Piet. 1:19–21), ja tällöin viitataan Vanhan testamentin kirjoituksiin, mutta ei tarkemmin määritellä, mihin (Lehtipuu & Weissenberg von 2017).

Heprealaisen Raamatun tekstien kirjoittajat ajattelivat toki säilyttävänsä viestejä Jumalalta, mutta jumalallisilla sanoilla oli välittäjänsä, profeetat (Nissinen 2017), eikä teksteiksi asti päätyneet välitysprosessi ollut suora. Vaikka poikkeustapauksissa Jumalan katsottiin puhuneen suoraan ja avoimesti kuten Moosekselle (4. Moos. 12:8; 5. Moos. 34:10), tekstien välittäjät eivät itse rohjeneet väittää olevansa tällaisessa asemassa. Heprealaiseen Raamattuun sisällytettiin Jumalan puhemuotoista aineistoa patriarkoille, Moosekselle, profeetoille, psalminlaulajille ja näkijöille, mutta viesti kohdistui aina kulloisellekin henkilölle ja ryhmälle ja tiettyyn tilanteeseen. Usein toistuva ilmaisu ”Jahve/Herra sanoi...” ei siten koodaa Jumalan välitöntä puhetta, vaan kirjoittajien kerrontaa Jumalan puheesta, käskyistä, lupauksista ja tuomioista. Edes kymmentä käskyä ei esitetä Jumalan kirjoittamina: Mooses sai ensin Siinailta Jumalan itse kirjoittamat liiton taulut mutta nähtyään kansan tekemän kultaisen sonnipsaan hän rikkoi nämä (2. Moos. 31:18; 32:16, 19). Uudet taulut olivat Mooseksen kirjoittamat (2. Moos. 34:27–28; Schmid 2019, 262). Heprealaisen Raamatun kirjoittajien oman ymmärryksen teksteistään voi siten sanoa olevan ensi sijassa välitettyä Jumalan sanaa ja sanoja Jumalasta.³

3 Uusi testamentti ei ole tässä suhteessa erilainen: Paavali ei kirjoittanut pyhiä kirjoituksia eivätkä evankelistat katsoneet olevansa profeettoja, vaikka saattoivatkin ajatella saaneensa keskuuteensa Jumalan erityisen lähettilään ja uuden liiton. Nykytutkimuksessa korostetaan myös sitä, miten monessa suhteessa Uuden testamentin kirjoittajat olivat juutalaisuuden sisällä.

Tärkeä kysymys on, kuinka kauas tästä itseymmärryksestä on siirrytty nykypäivän diskurssissa, jossa pyhille teksteille saataan lukea jonkinlaista toimijuutta: ”Raamattu sanoo” ja ”Raamattu opettaa”. Piispainkirje *Raamattu ja kirkko* (2021) ottaa tähän selvästi etäisyyttä ja käyttäen ennemmin ilmaisuja ”(Raamatussa) voi kuulla Jumalan äänen”, ”Jumala puhuu ihmiselle ja ihmisyyhteisöille Raamatun välityksellä” ja ”varsinainen... Jumalan sana on Jeesus Kristus”, mutta painottaa myös Raamatun samanaikaista inhimillistä ja jumalallista luonnetta ja Pyhän Hengen ”hengitystä” sen kautta.

Tällä diskurssilla on yhtymäkohtia siihen, miten Jumalasta puhutaan. Vanhan testamentin tutkimuksessa on kysytty, missä määrin Jumala käsitteellistettiin ihmistä muistuttavin tavoin ja ilmaisuin (esim. Knafel 2014; Smith 2016). Tämä antropomorfismiksi nimetty ilmiö on kuitenkin paljon jumalapuhetta ja uskontoa laajempi, kuten viimeaikainen kognitiivinen tutkimus antaa ymmärtää. Turvautumme antropomorfismiin, kun meidän tulee tehdä päätelmiä ei-ihmisiksi luokiteltavista entiteeteistä ja tieto ihmisistä aktivoituu (Waytz et al. 2010a). Meillä on taipumus nähdä muutkin kuin ihmiset ihmismäisinä erityisesti kokiessamme olevamme yksinäisiä tai kun meidän tulee koettaa olla tehokkaita sosiaalisia toimijoita ja ennakoita ympäristössä olevien esineiden tai elementtien piirteitä (Epley et al. 2008; Waytz et al. 2010b). Taipumus antropomorfismiin voi joissain tilanteissa olla muistille hyödyllistä (Baker et al. 2018). Kognitiivisesti suhtaudumme siis ympäristöömme niin kuin elottomat esineet, rakennukset tai luonto itse asiassa lähettäisivät meille viestejä tai kommunikoisivat kanssamme.

Jumala-käsitteitä tutkittaessa on huomattu, että vaikka jumalia ajatellaan ja käsitteellistetään myös kehollisten ja biologisten tekijöiden avulla, paljon yleisempää on ihmisen psykologisten piirteiden olettaminen jumalien ominaisuuksiksi. Jumalaa koskevien mentaalisten ominaisuuksien prosessointi oli nopeampaa, yleisempää, varmempaa ja johdonmukaisempaa kuin biologisten ominaisuuksien (Shtulman & Lindeman 2016).

Voidaanko siis olettaa, että joissain tapauksissa myös pyhät tekstit saavat ihmismäisiä piirteitä: ne osaavat puhua ja opettaa ja tunnistavat tunteemme tai tarpeemme. Tämä vaatisi enemmän tutkimusta. Vaikuttaa ilmiselvältä, että *kaikkia* ihmisen piirteitä ei hyödynnetä: pyhät tekstit eivät liiku omatoimisesti tai ojenna käsiään meitä kohti. Voisikin pohtia, missä määrin erilaiset psykologisen toimijuuden muodot luonnehtivat suhtautumista pyhiin teksteihin (vrt. Hodge 2018) ja millaista variaatiota tässä on havaittavissa esimerkiksi sen suhteen millaisissa tilanteissa henkilöt tai yhteisöt tekstejä käyttävät ja kuinka usein ovat niiden kanssa tekemisissä. Sisältönsä ja asemansa puolesta pyhät tekstit saattavat saada samoja piirteitä, joita luetaan jumalille ja muille yliluonnollisille toimijoille. Niillä voi olla ainakin moraalisia piirteitä, ne tuomitsevat tai palkitsevat toiminnasta; korkeampia kognitiivisia kykyjä, ne lukevat ajatuksia; ja tunteita, ne ovat täynnä iloa tai synkkyyttä.

Toisin kuin yleinen puhetapa antaa ymmärtää, tutkijat korostavat, että Raamattu ei puhu, sano tai opeta mitään. Tekstikokoelma ei ole itsenäinen ihmisenkaltainen toimija, joka puhuu tai toimii maailmassa. Pyhä teksti on aina jonkun ihmisen tai yhteisön ”pyhittäjä”, tavalli-

sista teksteistä erottama, ja jonkun käyttämä ja tulkitsema.⁴

Varhaisessa juutalaisuudessa käynnistyi kuitenkin myös toinen kehityskulku, jonka perillisistä mekin usein löydämme itsemme. Profetia kirjallistui ja aiemman tekstin tai perinteen *tulkinta* nähtiin inspiroituna (Jassen 2007; Antin 2019). Toisaalta erilaiset taivasmatkailut lisääntyivät ja välittäjähahmot esitettiin suoraan taivaallisen erityissanoman tuojina (jo muun muassa Daniel). Etenkin kaanonin muotoutuminen ensimmäisinä vuosikatoina jaa. kapseloi tietyt kokoelmat – erilaiset eri yhteisöissä – kulttuurisäilykkeiksi. Yhteisöt eroavat toisistaan siinä, missä määrin ne tunnustavat myös muiden, ei-kanonisten tekstien merkityksen, ja tunnistavat oman tulkintaperinteensä

4 Auktoriteetti-käsite tekstien yhteydessä on erityisen vaikea, koska sillä on oma sosiologinen kehyksensä: henkilöillä on auktoriteetti, ei teksteillä. Henkilö voi vedota tekstiin ja käyttää valtaansa tekstin määrittelyssä ja tulkinnassa. Jos henkilö joutuu perustelevaan valtaansa eli legitimoimaan sitä, hän on jo menettänyt luontaisen auktoriteettiasemansa (Furedi 2013). Teksteistä itsestään näemme vain perusteita tai seikkoja, joiden voimme arvailla olleen tekstien kirjoittajien valitsemia strategioita tai muotoja sanoman tueksi; emme tiedä, missä määrin ne hyväksyttiin. Tekstin kanoninen asema tuottaa illuusion, että kaikki strategiat ja väitteet olivat hyväksytyjä, vaikka kokoelman sisäiset ”äänet” ja vastakkaisetkin ilmaiset antavat aiheita olettaa toisin. Kaaanonin sisältä on aina etsitty keskeisempiä tekstejä ja erotettu ne kehällisemmistä tai itselle epämieluisemmista. Piispainkirje *Raamattu ja kirkko* 2021, 18–19, korostaa tekstien tunnettuutta kaanoniin päätyemisessä. Kaaanonin ulkopuolelle jäi kuitenkin myös tekstejä, jotka olivat laajasti tunnettuja ja käytettyjä (esim. Riemuvuosien kirja, 1. Henok, Hermaan paimen).

roolin kanonisten tekstien tulkinnassa (ks. esim. Bastubacka 2021; Huttunen 2021a, 2021b).

Miten muinainen tekstievidenssi auttaa ymmärtämään niitä käyttötapoja, joilla tekstit saavat erityisaseman? Nostan tässä esiin Qumranin⁵ tekstitutkimuksesta kolme osa-aluetta: tekstin materiaalsen muodon merkityksen, yhteisön ja sen rituaalisen elämän merkityksen sekä neuvottelun alati muuttuvan ja vanhentuvan sisällön kanssa.

1. Muodolla on väliä

Teksti välittyy aina jonkin materiaalsen muodon kautta. Nykyiset äänikirjat ovat hyvä esimerkki siitä, että jotkut kirjat toimivat kuultuna huomommin kuin toiset. Erilaiset välineet herättävät erilaisia oletuksia esimerkiksi kirjoittajasta tai kirjoituksen läpikäymästä prosessista: kirjailijan blogikirjoitusta ei arvioida samalla tavalla kuin kustannettua kirjaa. Wikipedia-artikkeli saa olla anonyymi kun taas tietosanakirja-artikkelin kirjoittajan

5 Qumranin käsikirjoitukset löydettiin 1947–56 Kuolleenmeren läheisyydessä olevista luolista ja on julkaistu Discoveries of the Judean Desert -sarjassa (DJD I–XL; lista nähtävissä: <http://orion.mscc.huji.ac.il/resources/djd.shtml>). Qumran-nimeä käytetään sekä paikannimenä että käsikirjoituskokoelman yhteydessä. Useat käsikirjoitukset ovat selvästi vanhempia kuin Qumranilla sijaitseva asutus (Crawford 2019, 141), joten tekstejä ei ole syytä tulkita vain tämän paikan valossa. Käsikirjoituksista noin neljäsosa sisältää myöhemmän heprealaisen Raamatun tekstejä, loput ovat muuta varhaisjuutalaista uskonnollista kirjallisuutta. Tekstit on ajoitettu noin vuosiin 250 eaa.–70 jaa.

tulee olla näkyvissä. Muoto vaikuttaa myös käyttöön: mobiiliraamattu kulkee kaikille ja sisältää helpon hakutoiminnon, painetun Raamatun käyttäjältä edellytetään enemmän tietoa, jotta hän löytää etsimänsä.

Ajanlaskun alun käsikirjoituskulttuurissa valtaosa kirjallisista teksteistä ja myös monet dokumentaariset tekstit (kuten kirjeet, sopimukset tai kauppakirjat) kirjoitettiin nahka- ja papyruskääröihin. Viimeaikaisessa tutkimuksessa on yhä enemmän otettu huomioon näitä materiaalisia tekijöitä Raamatun synnyn tutkimisessa. Qumranin tekstien joukossa ei ole säilynyt kääröjä, joissa olisi kovin laajoja kokonaisuuksia; tämä ei olisi käytännöllistä. Poikkeuksellisen hyvin säilynyt Jesajan kirjan käärö (1QIsa^a) on pitkä, 7,34 metriä, ja aiemmin tuntematon Tempelikäärö (11QT^a) vielä tätäkin pitempi, noin 8,15 metriä.⁶

Useiden metrien pituista kääröä ei rullattu kerralla auki eikä sen alku ja loppu ollut yhtä aikaa näkyvissä. Kääröä luettiin jaksoissa niin että muutama palsta kerrallaan oli näkyvissä. Lukijan täytyi osata kieltä (hepreaa, arameaa), sillä kirjoitus on konsonanttikirjoitusta, joka pitkälti vaati lukijaa täydentämään mielessään sanoihin oikeat vokaalit. Kirjurimerkinnot olivat tärkeä osa kääröjen antamaa informaatiota: sanoja oli korjattu ja poistettu, rivien väliin oli saatettu kirjoittaa, kirjoittamattomat aukkokohdat jaksottivat tekstiä luoden kappalejakoja ja erilaiset marginaalimerkinnot sisälsivät viestejä sekä lukijoille että uusille kirjureille (Tov 2004). Käärökulttuurissa ei vielä syntynyt pyhän vakiintu-

neen tekstikokoelman ideaa. Vaikka joillakin kokoelmilla, etenkin tooralla eli Mooseksen kirjoilla, oli ajanlaskun alussa yleisesti tunnustettu ja symbolisesti merkittävä asema, ei ole näyttöä siitä, että toorallakaan olisi ollut yhtä hyväksyttyä muotoa ja sisältöä.⁷ Kaikkia viittä Mooseksen kirjaa ei ole säilynyt yhdessä käärössä. Heparalaisen Raamatun tekstejä sisältävät kääröt eivät näytä olleen materiaalisesti sen kummempia kuin muutkaan säilyneet kääröt. Yksi ja sama kirjuri kirjoitti Samue-

Käärökulttuurissa on vaikea erottaa pyhiä tekstejä muista, saati vakiinnuttaa tekstien muotoa.

lin kirjan käärön ja Qumranin liikkeen oman Yhdyskunta- ja Seurakuntasäännön ja Siunauksia sisältävän tekstin ja teki Jesajan kirjakääröön korjauksia (Reymond 2018). Jotkut käsikirjoitukset ovat toisia laadukkaampia ja hienompia (muun muassa leveät marginaalit, tasalaatuinen kirjoitus), mutta nämä sisälsivät myös tekstejä, jotka eivät päätyneet kaanoniin.

7 Vasta pitkälti kristillisellä ajalla, kun koodeksit vähitellen yleistyivät, syntyi idea ”kirjasta”, jossa on kannet, alku ja loppu ja rajattu sisältö. Sisällön vakiintuminen odotti vielä painotaidon keksimistä.

6 Kääröt ovat nähtävissä sivulla <http://dss.collections.imj.org.il/>.

Käärökulttuurissa on vaikea erottaa pyhiä tekstejä muista, saati vakiinnuttaa tekstien muotoa. Qumranin tekstien joukosta tunnetaan kuitenkin varhaisimmat Vanhan testamentin ”selitystekokset”, kommentaarit.⁸ Esimerkiksi Habakukin pešerissä (1QpHab) erotetaan profeetta Habakukin kirjan teksti (Hab. 1–2) sen tulkinnasta. Tulkintakappaleet erottuvat selvästi niitä edeltävien sisennysten tai kirjoittamattomien rivin osien perusteella.⁹ Tulkinta alkaa tyypillisesti jollakin vakiintuneella formelilla, esimerkiksi *pišrō ‘al*, ”tämän tulkinta on/koskee”. Tämä kommentaarikeksintö ammensi muun muassa muinaislähi-itämaisestä unientulkintaperinteestä: viisaat osasivat tulkita unia ja jopa kertoa toisen näkemän unen (Dan. 2). Siten tulkintakin oli jumalallista ilmoitusta, nyt vain sen kohteeksi tulivat tekstit. Malleja omaksuttiin myös kreikkalaisen maailman Homeros-tulkinnan perinteestä (Hartog 2017).

Jahve-nimen kirjoitus muinaisheprealaisin kirjaimin erottuu Habakukin pešerin käärosta selvästi ja varjelee nimen säilyvyyttä ainakin kopioitaessa. Tapa on liitetty myös nimen pyhyyteen ja sen lausumattomuuteen; nimi ilmentää voimaa, joka Jumalalla uskottiin olevan ongelmien ratkaisemiseksi ja jonka väärää käyttöä tuli varoa. Marginaaleissa olevat

8 Arvovaltaisen tekstin yhtenä tunnusmerkkinä on pidetty sitä, että tekstiä aletaan siteerata ja tulkita, ks. lisää Pajunen 2021.

9 Käärö on nähtävissä sivulla <http://dss.collections.imj.org.il/>. Käärö on peräisin ensimmäiseltä vuosisadalta eaa. ja sisältää vain Habakukin kirjan lukujen 1 ja 2 lainaukset ja niiden tulkinnan, ei lukua 3, joka on hymni. Ks. vastikään ilmestynyt kommentaari Lim 2020 sekä kääroän suomennos teoksessa Sollamo ja Pajunen 2017.

X-merkit saattavat kertoa kääroän ääneen lukemisesta: yhden teorian mukaan merkit osoittivat, että rivin lopussa oleva tyhjä kohta ei ollut kappalejaon merkki vaan ajatus jatkui seuraavalla rivillä (Brooke 2014). Käärömuoto ei välitä samoja merkityksiä kuin kirjan muotoon puettu teksti eikä siltä voi odottaa samoja asioita kuin koodeksilta. Käärö välittää muita merkityksiä: teksti on performanssi, joka esitetään. Esitys vaatii taitoa. Teksti avautuu katkelma kerrallaan – kuin näytön ruutu, jota voi rullata. Profetaallinen ääni jatkuu, Jumala säilyy.

2. Tekstin pyhäksi tekeminen vaatii yhteisön

Pyhien tekstien tunnettuus ja käyttö vaihtelevat paljon. Sosialisointin ja kasvatuksen kautta opitaan usein joitakin keskeisiä kertomuksia, eettisiä periaatteita ja vakiintuneita muotoja kuten rukouksia tai uskontunnustuksia. Eräissä Qumranin teksteissä kasvatus- ja koulutusihanne on selvä: mukana tuli olla naiset ja lapset. Seurakuntasäännössä (1QSa) todetaan: ”Kun he liittyvät (liittoon), heidän tulee koota kaikki, myös lapset ja naiset. Heidän tulee lukea heidän kuultensa kaikki liiton lait ja saatava heidän ymmärtämään kaikki heidän säädöksensä, etteivät he erehtyisi (tietämättömyydessään)” (1QSa 1:4–5). Liikkeen piirissä olevat olivat mahdollisesti saaneet myös yksilöllistä opetusta siihen liittyessään (Yhdyskuntasääntö, 1QS 5), ja he kokoontuivat säännöllisesti yhteiseen neuvonpitoon, jossa myös luettiin tekstejä ääneen, keskusteltiin niistä ja rukoiltiin (1QS 6). Liikettä onkin luonnehdittu tekstiyhteiseksi: oman yhteisön identiteettiä ja merkityksellisyys kietoutuivat

tekstien ympärille (Popović 2017). Tekstejä esitettiin, opiskeltiin, tutkittiin, tulkittiin ja tuotettiin. Kenties pešerkirjallisuuskin syntyi tällaisissa yhteisissä istunnoissa tai niitä varten. Kyse oli luku- ja kirjoitustaitoisen eliitin toiminnasta, mutta kokoon-tumisissa ja rituaaleissa muutkin tulivat tekstien vaikutuspiiriin.

Rituaalinen konteksti voi antaa teksteille erityisen, tunnepitoisen merkityksen. Mutta rituaaleissa ei vain opita sisältöjä, ne voivat olla edellytyksenä ylipäättään pyhinä pidettyihin asioihin sitoutumiseen – ja näihin kuuluvat myös pyhät tekstit. Qumranin teksteissä on useita aiemmin tuntemattomia rukous- ja psalmitekstejä, joissa osallistujat kuvittelivat itsensä osaksi taivaallista jumalanpalvelusta tai Jumalan ylistystä yhdessä enkelien ja jumalolentojen kanssa. Esimerkiksi Sapattiuhrin laulut on kokoelma käsikirjoituksia, joissa ylistetään ainutlaatuisella tavalla Jumalaa peräkkäisinä sapatteina. Tekstien lukijoina tai kuulijoina laulujen laulajat olivat taivaallisen hoviväen joukossa eikä taivaallista joukkoa arasteltu kutsua jumaliksi (*elim, elohim*): ”Kohotta-kaa Hänen korkeutensa ylen korkealle, (te) korkeat jumalat” (4Q403 Ii 33).¹⁰ Lopulta koko taivaallinen temppele kaikkinen rakenteineen ja koristeineen ylisti Jumalaa: ”Kaikki kaikkeinpyhimmän taidolla tehdyt esineet kiiruhtavat (laulamaan) ihmeellisiä psalmeja kaikkeinpyhimmässä ... kaikki niiden taidolla tehdyt esineet ... Hänen kaikkeinpyhimpänsä valtaistuinväen ylistävät yhdessä...” (4Q403 Iii 13–15). Näissä kuvauksissa on yhtymäkohtia esimerkiksi profeetta Hesekielin näkyihin taivaasta. Sapattiuhrin lauluissa Jumala

manifestoitui ylistyksessä; voisi jopa ajatella Jumalan materialisoituneen ihmeellisellä tavalla (kuvitellussa) temppe- lissä ja sen osissa. Se, että näitä tekstejä on kirjoitettu muistiin ja kopioitu, kertoo sekä rituaalien merkityksestä että tekstuaalisuuden kasvusta.

Eräs toinen Qumranin rukouskäsikirjoitus sisältää laajan kokoelman aiemmin tuntemattomia psalmeja. Tästä niin kutsutusta Hymnien kirjasta käy ilmi, miten rukoilija saattoi ajatella olevansa yhtä aikaa etuoikeutettu osallistuja jumalten neuvostossa, joka sai jumalallista viisautta, ja täysin mitätön, syntisen ihmiskunnan tomusta tehty jäsen: ”Minä kiitän Sinua, Jumalani, sillä olet tehnyt ihmeitä tomusta, saven olet muovannut erinomaisesti. Mikä minä olen? Sinä [o]petit minua ymmärtämään totuutesi neuvonpidossa, opastit minua ihmeellisistä teoistasi” (1QH^a 19:6–7).¹¹ Jumalan sanaan tai lakeihin viitataan tekstissä yllättävän harvoin siihen nähden, miten tärkeää oikea lainnoudattaminen ja laintulkinta Qumranin liikkeelle oli. Muissa liikkeen teksteissä on paljon sääntöjä ja perinteitä esimerkiksi sapatin noudattamisesta, varastetusta omaisuudesta, oikeasta juhkalenterista, ruoka- ja puhtaussäädöksistä, valoista, lupauksista ja uhreista. Pyhien tekstien eettiset ja moraaliset säädöset omaksutaan usein toissijaisesti, yhteisön koodien mukaan. Rukoustekstien merkitys on tärkeä, sillä ne näyttävät, miten yksi juutalainen liike ajanlaskun alussa saman- aikaisesti hyödynsi aiempia perinteitä ja loi luovasti uusia ja että jäsenten motivaatio lainnoudattamiseen nousi todennäköisesti hengellisestä ja sosiaalisesta yhteydestä.

10 Käännös tässä ja alla Juha Pakkala, teoksessa Sollamo & Pajunen (toim.) 2017.

11 Käännös Katri Antin, teoksessa Sollamo & Pajunen (toim.) 2017.

Pyhää tulkintaa tuotettiin aktiivisesti liikkeen rituaaleissa ja hierarkkisissa kokouksissa.

3. *Sisältö ei ole muuttumaton*

Pyhän tekstin tärkeimpänä voimana voisi pitää sen ajattomuutta tai oikeastaan sen ajankohtaisuutta: tunnetta tai uskomusta, että tekstillä on juuri meille sanottavaa. Tämän uskomuksen alla teksteiltä hyväksytään paljon ristiriitaisuuksia ja vanhentuneita käsityksiä ja käytäntöjä. Jahve-usko oli koetuksella ensimmäisessä pakkosiirtolaisuudessa 500-luvulla eaa. Joidenkin mukaan looginen johtopäätös oli, että Jumala oli hylännyt kansansa. Voimme kuitenkin lukea Vanhan testamentin lehdiltä uudestaan ja uudestaan vasta-narratiiveja:

Suullisessa perinteessä uutta laintulkintaa tapahtui koko ajan, vain osa siitä tallentui kirjoituksiin.

Jumala pelastaa jäännöksen, Jumala kyllä rankaisee mutta sitten rakentaa uudelleen, pelastaja tulee, uusi liitto solmitaan. Sisältö muuttui yhä uudestaan ja uudestaan. Laintulkinnan alueella ei tarvitse ihmetellä, miksi käskyt muuttuivat, kymmenestä käskystä on kaksi versiota ja varhaista lakikokoelmaa (2. Moos. 20–23)

tulkitaan uudestaan muuttuneessa tilanteessa (5. Moos. 12–26: 3. Moos. 17–26). Suullisessa perinteessä uutta laintulkintaa tapahtui koko ajan, vain osa siitä tallentui kirjoituksiin.

Edellä mainitussa Habakukin pešerissä Habakukin kirjan tapahtumien tulkittiin koskevan oman liikkeen historiaa ja ajankohtaisia tapahtumia. Siten esimerkiksi Habakukin kirjan pelottavat ”kaldealaiset” (babylonialaiset 600–500-luvulla eaa.) olivat pešerin kirjoittajan tulkinnassa ”kittiläisiä” eli todennäköisesti roomalaisia, jotka valloittivat Jerusalemin 63 eaa. Habakukin sortajiin kohdistetut voi-huudot koskivat pešerin kirjoittajan mukaan ”pahoja pappeja”, Jerusalemin hasmonihallitsijoita (n. 140–37 eaa.), jotka yhdistivät ylipappouden ja kuninkuuden.

Ajankohtaistava tulkinta tuskin kuitenkaan tyhjensi Habakukin kirjan merkitystä. Uskon, että toisessa tilanteessa pešerin kirjoittaja saattoi nähdä profeetta-tekstin puhuvan jostakin muustakin, vaikka useampia kommentaareja ei olekaan säilynyt. Käärön käsiala paljastaa, että ensimmäinen kirjuri ei vienyt tehtävänsä päätökseen: lopun on kirjoittanut toinen kirjuri (palstan 12 rivin 13 kolmanesta sanasta eteenpäin; Brooke 2014). Muutkin korjaukset voivat olla merkkejä siitä, että käärö on kopioitu aiemmasta käsikirjoituksesta, joten se ei ollut ainoa laatuaan. Emme kuitenkaan tiedä, kuinka tunnettu tai hyväksytty tämä käärö oli. Jos yhdestä tulkinnasta tuli yleisesti tunnettu, oli uudessa tilanteessa kenties helpompi valita jokin toinen teksti selitettäväksi ja oman sanoman eteenpäin viemiseksi kuin alkaa muokata olemassa olevaa tulkintaa. Kiinnostavaa on, että myös psalmeja tulkittiin tällä tavoin (esim. Psalmipešer 4Q171); runolliset tekstitkin saatettiin

nähdä profeetallisina, etenkin lukemalla ne kuningas Daavidin sepitelmiin. Tulkin-nasta itsestään saattoi tulla pyhä oman aikansa sukupolvelle ja kenties myös seuraaville, jos se miellettiin perustajien kirjallisuudeksi.

Vaikka pešereitä on usein luettu pienen juudealaisen vastarintaliikkeen teksteinä, ne kertovat merkittävistä askeleista raamatuntulkinnan tiellä. Sen sijaan, että aiempaa tekstiä olisi kirjoitettu uudelleen tai korjattu, nyt oma tulkinta tehtiin näkyväksi. Samassa paketissa tulivat kaikki tulkinnan haasteet: Mikä jakso valitaan tulkittavaksi? Miten tulkittava teksti jaksotetaan? Mikä merkitys on tekstin historiallisella kontekstilla? Kenelle tulkinta kohdistetaan? Voiko tekstillä olla useita merkityksiä yhtä aikaa? Kommentaarit jäivät vielä tänä aikana harvinaisuudeksi, mutta sitaatti+tulkinta -kaavaa käytettiin muutoin tekstien sisällä, muun muassa Uudessa testamentissa.

Toinen esimerkki sisällön muuttumisesta voisi olla Jumalan nimi. Hепrealaisessa Raamatussa Jumalasta käytetään useita nimiä: El, Elohim, El Eljon, Jahve, Jahve Elohim, Jahve Sebaot, Jah (esim. *hallelu-jah*, ”ylistäkää Jahvea”), Adonaj (Herra). Lisäksi Shem (Nimi) ja Kavod (kunnia, kirkkaus) viittaavat läheisesti Jumalaan tai tämän läsnäoloon. El ja Baal olivat tunnettuja jumaluuksien nimiä muista lähteistä; El oli ylin jumala (mm. Ugarit). Millä nimellä kutsua Jumalaa? Jahven ajatellaan omaksuneen muiden jumaluuksien piirteitä ja kohonneen jumalien neuvostossa hierarkian huipulle, mutta muutkaan nimitykset eivät lakanneet. Qumranin liikkeen omista teksteissä El on yksi yleisimmistä nimistä, sillä se sopi liikkeen ajatukseen Jumalasta taivaallisen hoviväen, henkien ja ihmisten

johtajana (Meyer 2022). Kun Jahve käännettiin kreikaksi useimmiten termillä *kyrios*, ”Herra”, hämärtyi vähitellen nimen luonne nimenä. Samoin voi nähdä käyneen Jeesus Nasaretilaiselle, josta tulee yleisnimeillä tunnettu Kristus (voideltu, messias). Yksityisestä tulee yleistä, historiallisesta ajatonta.

3. Johtopäätöksiä

Pyhien tekstien venyminen nykypäivän konteksteihin voi tuntua maallistuneesta lukijasta vieraalta. Olen tässä pyrkinyt osoittamaan jotakin siitä dynamiikasta, jolla joitakin tekstejä erotetaan muista erillisiksi ja pidetään siinä asemassa, ja mitä seurauksia näillä on.

Ensiksi on huomattava ne välineet, jotka mahdollistavat pyhien tekstien käyttämisen ja säilymisen ja joissain tapauksissa erityisluonteen. Pyhien tekstien kokoelmaa, ”Raamattua”, ei olisi syntynyt ilman kirjakeksintöä, jossa yksiin kansiin voitiin koota kaikki tarpeellinen. Kääröt olivat joustavampia ja vaativat monenlaista taitoa käyttäjältään. Esineenä pyhää tekstiä sisältävä käärö ei eronnut muista, tai kaikkia perinnettä sisältäviä ja tulkitsevia tekstejä pidettiin jossain määrin pyhinä tai pyhinä niitä hallussa pitävillä yhteisöille. Tavallista pienemmät tai pienempää kirjoitusta sisältävät kääröt olivat mahdollisesti ”yksityiseen” käyttöön tarkoitettuja. Profeetallisia tekstejä erotettiin niiden tulkinnasta ensimmäistä kertaa systemaattisesti pešer-kirjallisuudessa, joissa tulkitsijoita pidettiin jumalallisen tiedon välittäjinä sen ajan tilanteeseen. Sekä kääröjä että koodekseja korjattiin, käsikirjoituskulttuuriin ei

kuulunut ajatus muuttumattomasta tekstistä. Nykyinen digikulttuuri on muuttamassa tekstien käyttötapoja ja kenties myös kommentointi- ja korjaustapoja osittain fragmentaariseen ja hallitsemattomampaan suuntaan. Sen vuoksi on kiinnostava katsoa, miten nykyisissä välineissä tullaan merkitsemään tai korostamaan tiettyjen tekstien erityisyyttä, pysyvyyttä tai alkuperää.

Toiseksi yhteisö määrittelee, mitkä tekstit ovat pyhiä. Tämä tapahtuu sekä tiedostetusti, torjumalla joitakin tekstejä ja kopioimalla, levittämällä ja opettamalla toisia, että tiedostamatta, nostamalla tietyt tekstit liturgiassa tai tulkinnassa keskiöön tai olemalla yksien tekstien kanssa enemmän vuorovaikutuksessa kuin toisten. Johtotason näkemys saattaa olla toinen kuin rivijäsenen näkemys. Yhteisön jäsen ei omaksu vain tiedollisesti pyhien tekstien merkitystä vaan usein luo niihin oman suhteen ja voi osallistua yhteisön rituaaliseen elämään vähillään tiedoilla pyhien tekstien sisällöstä. Qumranin rikas rukoustekstikoelma osoittaa, että lainhurskaudetaan tunnetun liikkeen jäsen saattoi hyvin pitää lakitekstejä vähemmän tärkeinä kuin osallistumista taivaalliseen jumalanpalvelukseen; lakeihin panostaminen seurasi yhteisöllisyydestä. Lainnoudattaminen, esimerkiksi sapatin pitäminen, oli osa jumalanpalvelusta. Pyhien tekstien moraalisten periaatteiden tulkinta ja ohjeet käytännön elämään opitaan yhteisössä. Jos jonkin kohdan tulkinta eroaa näkyvästi toisen ryhmän tulkinnasta, tästä voi tulla symbolinen merkki, kuten saattoi käydä Qumranin liikkeessä tiettyjen puhtausääntöjen tai kalenterin suhteen.

Kolmanneksi pyhien tekstien määritelmään voisi liittää attribuutin muuttuva. Vaikka pyhät tekstit ovat nykymaailmassa usein vanhoja ja mielletään vain vähän muuttuneiksi, itse tekstit sisältävät jatkuvaa uudelleentulkintaa. Niiden kirjoittajien yksi periaate on olla luovuttamatta, kun muuttuva tilanne toi vanhan perinteen uuteen valoon. Kirjoittajat jatkavat sinnikkäästi uuden merkityksen etsimistä ja silti jossain määrin vanhan säilyttämistä. Tällainen periksiantamattomuus näyttäytyy yksille keinotekoisena, toisille se on merkki tekstien elävyydestä ja ”hengityksestä”. Erään pešerin kirjoittajan tulkinta, jossa muinaisista babylonialaisista tuli ensimmäisen vuosisadan eaa. roomalaisia, ei tehnyt

Kolmanneksi pyhien tekstien määritelmään voisi liittää attribuutin muuttuva.

tyhjäksi muinaisten babylonialaistenkaan merkitystä ja muistoa, mutta antoi välineen oman ajan tapahtumien käsittelyyn kirjallisin keinoin. Vihollisia, jotka pešerin mukaan tulevat saamaan jumalallisen rangaistuksen, ei nähty vain ulkona vaan myös oman kansan sisällä, ja siten oli kyse omien rauhoittelusta. Periaatteessa uudelleentulkinnoina on kyse myös yksityisen tekemisestä yleiseksi, Jumalan toiminnan siirtämi-

sestä myös omaa tilannetta koskevaksi ja ihmiskunnan historian piirteiden omaksu- misesta oman ajan silmälaseiksi.

Ajanlaskun alusta tähän päivään on kuljettu pitkä matka. Raamattu on kulttuurinen esine, joka tunnetaan kaikkialla maailmassa. Raamatun tekstin muuttuminen tulee konkreettisesti vastaan kulloinkin käytössä olevissa käännöksissä: Mikael Agricolan suomi toimisi huonosti 2000-luvulla. Vaikka vanhoihin tuttuihin käännöksiin suhtaudutaan usein tunnepi- toisesti, viimeaikainen UT2020 osoitti, että uudesta käännöksestä voi tulla myös suosittu.¹² Kääntämisperiaatteet sanelevat kenelle käännös kohdistetaan; UT2020- projektissa kohderyhmä oli tarkkaan valittu ja käännöstä myös testattiin.¹³ Nyt on alkanut VT2028-projekti, jossa tehdään uusi käännös Vanhan testamentin alkukie- lestä mobiilikäyttöä varten.

Kääntäminen asettaa kääntäjät kuitenkin aina sen kysymyksen äärelle, mistä alkukielisestä tekstistä käännetään. Raamatun käsikirjoituksia on lukuisia. Vanhan testamentin osalta ollaan erityisen haastavassa tilanteessa: varhaisin kokonai- nen hepreankielinen käsikirjoitus on keskiaikainen, noin vuodelta 1008 jaa. Kreikankieliset Uuden ja Vanhan testa- mentin varhaiset kokonaiset koodeksit ovat puolestaan 300–400-luvuilta jaa. ja poikkeavat monin paikoin heprealaisesta tekstistä. Kreikankielisen tekstin alkupe- räisiä muotoja jäljitetään kuitenkin myös

lukuisten muiden (usein keskiaikaisten) käsikirjoitusten, kirkkoisien lainausten ja tytärkäännösten (kreikasta käännettyjen muunkielisten käsikirjoitusten) perusteel- la.¹⁴

Qumranin tekstit olivat kahdella tavalla merkittäviä: ne toivat esiin yli tuhat vuotta aiempaa varhaisempia heprean- ja arameankielisiä käsikirjoituk- sia ja käsikirjoituksen palasia eli karkeasti ajalta 250 eaa.–70 jaa. Verrattuna keski- aikaiseen koodeksiin Qumranin käärot näyttävät todennäköisemmin, millaisia vaikkapa Jeesus Nasaretilaisen käyttämät pyhät kirjoitukset olivat. Ne myös osoittavat konkreettisesti, että teksti- muoto ei monen kirjan osalta ollut vielä vakiintunut. Toiseksi Qumranin tekstit toivat uudenlaista painoarvoa kreikankie- lisen Vanhan testamentin tutkimukselle: ne antoivat aiheita olettaa, että jos kreikankielinen teksti poikkeaa heprealai- sesta, syy ei välttämättä ollut kääntäjän vaan näillä kääntäjillä saattoi olla poik- keava heprealainen tekstimuoto käytös- sään.

Niin sanottu ritualisoituminen Catherine Bellin terminologian mukaan (Bell 2009) on strateginen tapa luoda valtasuhteita antamalla joillekin toimin- noille arkipäiväisestä poikkeava piirre ja kontrolloimalla näitä. Tekstien ritualisoi- tuminen voi tapahtua lukuisilla tavoilla, kontekstista riippuen. Ilmiselviä erottami- sen ja erottumisen mekanismeja nykyajassa

12 Pipliaseuran kyselyn mukaan käännös sai vuodessa noin puoli miljoonaa käyttäjää, <https://www.piplia.fi/tiedote-ut2020-kaannos-kaytossa-vuoden-kaannoksella-noin-puoli-miljoonaa-kayttajaa/>. UT2020 on saatavilla sivulla <https://raamattu.fi/ut2020>.

13 Tieteellistä arviota ja keskustelua käännök- sestä, ks. *Teologinen Aikakauskirja 2* (2021).

14 Suomalainen Septuaginta-tutkimus on ollut uraauurtavaa sekä käännöstekniikan tutkimisessa että uusien kriittisten Septuaginta- editioiden laatimisessa, ks. Aejmelaeus et al. 2018 (toim.).

ovat esimerkiksi se, että perinteinen Raamattu on tunnistettava objekti, ohuelle erityispaperille painettu, käänös on virallisen instituution hyväksymä ja teksti on liturgisessa käytössä. Mutta mekanisme on paljon muitakin, lähtien liturgiasta ”Tämä on Jumalan sana” vastauksesta luettuun tekstiin, aina Raamatun käyttöön ekumeenisten oppikeskustelujen perusteina. Kun jokin elementeistä muuttuu tai puuttuu, avautuu mahdollisuuksia haastaa pyhän tekstin erottamisen mekanismeja ja määritellä uusia. Toiset haluavat haastaa tekstin toimijuuden itsenäisenä agenttina, toiset säilyttää sen.

Kirjoittaja

Jutta Jokiranta

Jutta Jokiranta on Vanhan testamentin ja lähialojen tutkimuksen professori ja Teologisen tiedekunnan tutkimusvaradekaani Helsingin yliopistossa. Hän on tutkinut erityisesti varhaisuutalaisuutta ja Qumranin liikettä ja on kiinnostunut kognitiivisten ja sosiaali-tieteellisten näkökulmien ja raamatuntutkimuksen vuoropuhelusta.



Kuva: Veikko Somerpuro

Lähteet

Aejmelaeus, A., Kujanpää, K., & Tucker, M. (toim.) (2018). *Sisälle Septuagintaan*. Suomen Eksegeettisen Seuran julkaisuja 116. Helsinki: Suomen Eksegeettinen Seura.

Antin, K. (2019). *Transmission of divine knowledge in the sapiential Thanksgiving Psalms from Qumran*. Vanhan testamentin eksegetiikan väitöskirja. Helsingin yliopisto.

Anttonen, V. (2000). Sacred. Teoksessa W. Braun & R. T. McCutcheon (toim.), *Guide to the study of religion* (s. 271–282). London: Cassell.

Baker, L. J. & Hymel, A. M. & Levin, D. T. (2018). Anthropomorphism and intentionality improve memory for events. *Discourse Processes*, 55, 241–255.

Bastubacka, J. (2021). Ortodoksien pyhät tekstit. Teoksessa J. Jokiranta & N. Nikki (toim.), *Kirjakääröistä digiraamattuun. Pyhän tekstin idea, muoto ja käyttö*. Suomen Eksegeettisen Seuran julkaisuja 122 (s. 298–317). Helsinki: Suomen Eksegeettinen Seura.

Bell, C. (2009 [1992]). *Ritual theory, ritual practice*. New York: Oxford University Press.

Brooke, G. J. (2014). Physicality, paratextuality and Peshar Habakkuk. Teoksessa S. H. Aufrère, P. S. Alexander & Z. Pleše (toim.), *On the fringe of commentary. Metatextuality in ancient near eastern and ancient mediterranean cultures*. Orientalia Lovaniensia Analecta 232 (s. 175–193). Leuven: Peeters.

Crawford, S. W. (2019). *Scribes and scrolls at Qumran*. Grand Rapids, MI: Eerdmans.

Epley, N., Waytz, A., Akalis, S. & Cacioppo, J. T. (2008). When we need a human. Motivational determinants of anthropomorphism. *Social Cognition*, 26, 143–155.

Furedi, F. (2013). *Authority. A sociological history*. Cambridge: Cambridge University Press.

Hartog, P. (2017). *Peshar and hypomnema. A comparison of two commentary collections from the hellenistic-roman period*. Studies on the Texts of the Desert of Judah 121. Leiden: Brill.

Hodge, K. M. (2018). Sorting through, and sorting out, anthropomorphism in CSR. *Filosofia Unisinos – Unisinos Journal of Philosophy*, 19, 282–293.

Huttunen, N. (2021a). Mikä Raamatussa on sitovaa? Päivi Räsä-

sen raamatuntulkinta. Teoksessa J. Hallamaa, K. Tervo-Niemelä & I. Peltomäki (toim.), *Teologia eletyn uskonnon tulkkina. Normatiivisuus ja uudistuvat metodit*. Suomalaisen Teologisen Kirjallisuusseuran julkaisuja nro 298 (s. 108–126). Helsinki: Suomalainen teologinen kirjallisuusseura.

Huttunen, N. (2021b). Modernisoitu Paavali: Päivi Räsäsen tulkinta Roomalaiskirjeestä. *Teologinen Aikakauskirja*, 126, 404–18.

Jassen, A. P. (2007). *Mediating the divine. Prophecy and revelation in the Dead Sea Scrolls and Second Temple Judaism*. Studies on the Texts of the Desert of Judah 68. Leiden: Brill.

Jokiranta, J. & Nikki, N. (toim.) (2021). *Kirjakääröistä digiraamattuun. Pyhän tekstin idea, muoto ja käyttö*. Suomen Eksegeettisen Seuran julkaisuja 122. Helsinki: Suomen Eksegeettinen Seura.

Knaf, A. K. (2014). *Forming god. Divine anthropomorphism in the Pentateuch*. Siphut 12. Winona Lake: Eisenbrauns.

Lehtipuu, O. & Weissenberg von, H. (2017). Miten Raamatusta tuli Raamattu? Teoksessa P. Luomanninen, N. Huttunen, & K. Virtanen (toim.), *Sisäänkäyntejä Raamattuun. Tulkitsijan kirja* (s. 35–58). Helsinki: Kirjapaja.

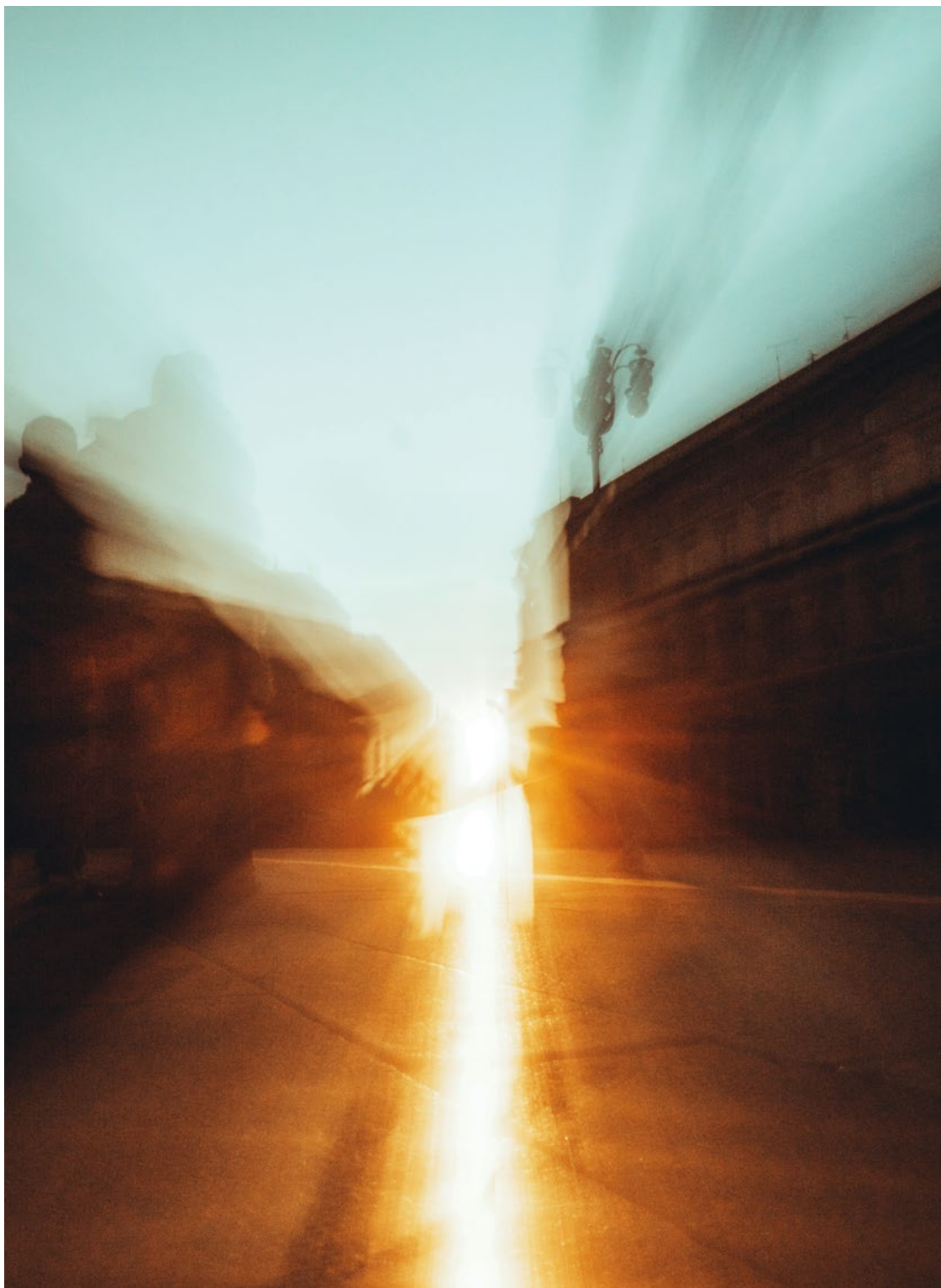
- Lim, T. H. (2020). *The earliest commentary on the prophecy of Habakkuk*. Oxford: Oxford University Press.
-
- Meyer, A. (2022). *Naming god in early Judaism. Aramaic, Hebrew, and Greek*. Studies in Cultural Contexts of the Bible 2. Leiden: Brill.
-
- Nissinen, M. (2017). *Ancient prophecy. Near eastern, biblical, and Greek perspectives*. Oxford: Oxford University Press.
-
- Pajunen, M. S. (2021). Qumranin liikkeen pyhät traditiot. Teoksessa J. Jokiranta & N. Nikki (toim.), *Kirjakääröistä digiraamattuun. Pyhän tekstin idea, muoto ja käyttö*. Suomen Eksegeettisen Seuran julkaisu 122 (s. 39–67). Helsinki: Suomen Eksegeettinen Seura.
-
- Pessi, A. B., Pitkänen, V., Westinen, J. & Grönlund, H. (2018). *Pyhyiden ytimessä. Tutkimus suomalaisten arvoista ja pyhyiden kokemisesta*. Haettu 24.3.2022 osoitteesta https://www.e2.fi/media/julkaisut-ja-alustukset/pyhyiden_ytimessa.pdf.
-
- Popović, M. (2017). Reading, writing, and memorizing together. Reading culture in ancient Judaism and the Dead Sea Scrolls in a Mediterranean context. *Dead Sea Discoveries*, 24, 447–470.
-
- Raamattu ja kirkko (2021). Suomen evankelis-luterilaisen kirkon piispojen puheenvuoro. Suomen ev.-lut. kirkon julkaisuja, Piispainkirje 2021. Haettu 24.3.2022 osoitteesta <https://evl.fi/piispat/piispainkirjeet/raamattu-ja-kirkko>.
-
- Reymond, E. D. (2018). The scribe of 1QS, 1QSa, 1QSB, 4Q53 (4QSam^c), 4Q175 and three features of orthography and phonology. *Dead Sea Discoveries*, 25, 238–254.
-
- Schmid, K. (2019). *A historical theology of the Hebrew Bible*. Translated by P. Altmann. Grand Rapids: Eerdmans.
-
- Shtulman, A. & M. Lindeman (2016). Attributes of god. Conceptual foundations of a foundational belief. *Cognitive Science*, 40, 635–670.
-
- Smith, M. S. (2016). *Where the gods are. Spatial dimensions of anthropomorphism in the biblical world*. New Haven: Yale University Press.
-
- Sollamo, R. & Pajunen, M. S. (2017). *Kuolleenmeren kirjakääröt. Kriittinen suomennosvalikoima*. Helsinki: Gaudeamus.
-
- Tov, E. (2004). *Scribal practices and approaches reflected in the texts found in the Judean desert*. Leiden: Brill.
-
- Waytz, A., Epley, N. & Cacioppo, J. T. (2010a). Social cognition unbound. Insights into anthropomorphism and dehumanization. *Current Directions in Psychological Science*, 19, 58–62.
-
- Waytz, A., Cacioppo, J. T. & Epley, N. (2010b). Who sees human? The stability and importance of individual differences in anthropomorphism. *Perspectives on Psychological Science*, 5, 219–232.
-
- Weissenberg von, H. & Seppänen, C. (2015). Constructing the boundary between two worlds. The concept of sacred in the Qumran texts. Teoksessa H. Tervanotko & M. S. Pajunen (toim.), *Crossing imaginary boundaries. The Dead Sea Scrolls in the context of Second Temple Judaism*. Publications of the Finnish Exegetical Society 108 (s. 71–97). Helsinki: Suomen Eksegeettinen Seura.
-
- Weissenberg von, H. & Uusimäki, E. (2017). Are there sacred texts in Qumran? The concept of sacred text in light of the Qumran collection. Teoksessa A. Feldman, M. Cioatä & C. Hempel (toim.), *Is there a text in this cave? Studies in the textuality of the Dead Sea Scrolls in honour of George J. Brooke* (s. 21–41). Leiden: Brill.
-



#6

Analytisk kemi – några reflektioner

Johan Bobacka



Abstract

Analytical chemistry is an interdisciplinary field of science related to many practical applications, such as clinical diagnostics, environmental monitoring and industrial process analysis. Over the last 50 years, chemical analytics has evolved from centralized laboratory measurements towards on-line and distributed analysis, including wearable chemical sensors for personal health monitoring. In this article I wish to reflect upon these developments in analytical chemistry, illustrated by examples from my own research. The text provides a glimpse of analytical chemistry from my personal perspective.

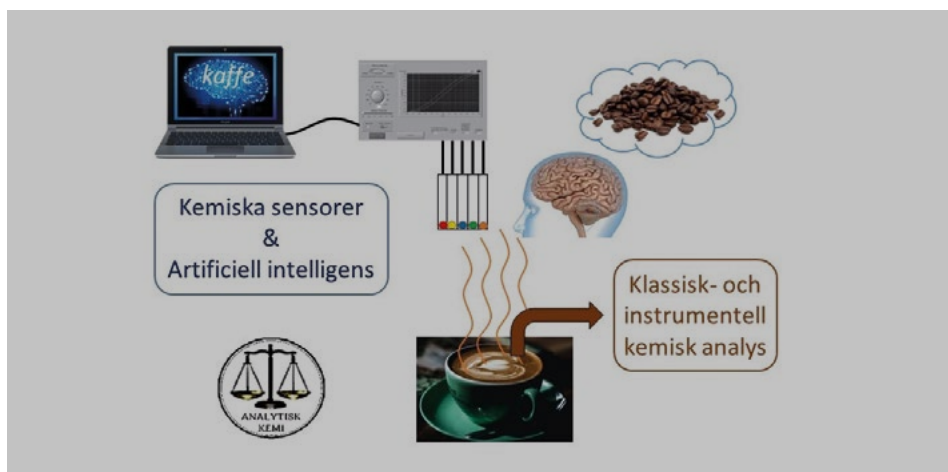
1. Analytisk kemi

Analytisk kemi kan definieras på följande, rätt komplicerade men uttömmande sätt: *Analytisk kemi är en vetenskapsgren som utvecklar och tillämpar metoder, instrument och strategier för att erhålla information om sammansättning och egenskaper hos materia i rum och tid, samt för att erhålla information om värdet av dessa mätningar, dvs. deras osäkerhet, validering och/eller spårbarhet till fundamentala standarder (IUPAC, 2022).*

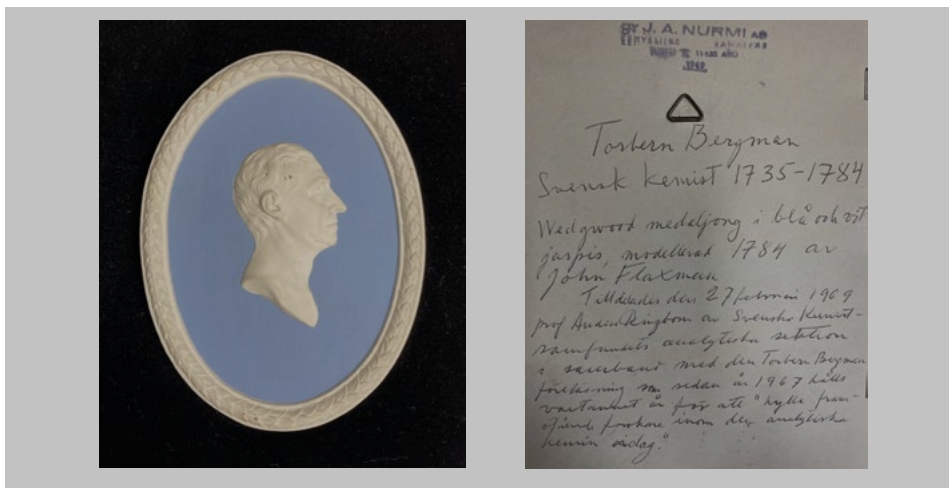
Det finns ett mycket stort antal kemiska analysmetoder och möjliga tillämpningar. I Europa utförs omkring en miljon kemiska analyser per timme, vilka bidrar med viktig information för samhället (Barek et al., 2012). Det har uppskattats att nästan 50 % av alla lagar och förordningar som finns inom EU kräver kemiska analyser för att säkerställa att dessa lagar och förordningar efterföljs (Barek et al., 2012). Analytiska kemister bidrar till att utveckla de verktyg som behövs för dessa analyser.

Nya analysmetoder, instrument och strategier utvecklas och används kontinuerligt inom viktiga områden, såsom klinisk-, miljö- och processanalys. Varje tillämpning ställer specifika krav på noggrannhet, precision, analystid, certifiering, validering och kostnad per analys. Medan klassisk gravimetri kan ge mycket noggranna resultat, så har instrumentella metoder ofta en mycket lägre detektionsgräns, dvs. förmår detektera extremt låga koncentrationer. De instrumentella metoderna lämpar sig väl för automatisering och miniatyrisering, vilket i sin tur förkortar analystiden, minskar volymerna av prov och reagens, samt minskar på produktionen av avfall.

Förutom behovet av avancerade analysinstrument och skickliga operatörer, så finns det ett växande behov av billiga analysinstrument, såsom kemiska sensorer, vilka är lätta att använda i stor skala. Eftersom kostnaden för att erhålla kemisk information inte bör överstiga konsekvenserna av att inte ha denna information, så har kostnadseffektiva analysmetoder



Grafiskt abstrakt



Figur 1. Torbern Bergman medaljong (bilden till vänster) som tilldelades professor Anders Ringbom av Svenska Kemistsamfundets analytiska sektion år 1969. Texten på medaljongens baksida (bilden till höger).

såsom kemiska sensorer en klar fördel ifall sensorerna kan uppfylla de krav som ställs på analyserna. Detta visar att analytisk kemi spelar en viktig roll i vårt moderna samhälle. Utvecklingen av nya instrument för kemiska analyser går hand i hand med utvecklingen inom många andra områden, såsom materialvetenskap, kemiteknik, elektronik, automation och informationsteknologi.

2. Utvecklingen av analytisk kemi vid Åbo Akademi

Den första professuren inom analytisk kemi i Norden grundades vid Åbo Akademi år 1943 och innehades av Anders Ringbom, som blev tilldelad Torbern Bergman medaljongen år 1969 (Figur 1).

Sedan dess har vår forskning utvecklats från komplexometri och instrumentell analys, via elektriskt ledande polymerer, till andra elektroaktiva material och kemiska sensorer.

Elektroanalytisk kemi har länge varit en central forskningsinriktning för vårt laboratorium. Redan år 1988 ordnade Ari Ivaska (professor emeritus) konferensen ElectroFinnAnalysis i Åbo. Konferensen samlade ett stort antal eminenta deltagare (Figur 2). Konferensserien inleddes egentligen redan år 1986 på Irland och har sedan dessa ordnats vartannat år, numera under namnet ESEAC. Konferensen ordnades senast i Vilnius (Litauen) den 5-9 juni 2022 (18th International Conference on Electroanalysis, ESEAC 2022).

Under de senaste 30 åren har analytikerna vid Åbo Akademi gjort banbrytande arbete inom området jonselektiva elektroder med fast kontakt baserad på elektriskt ledande polymerer som jon-till-elektronö-



Figur 2. Deltagare i ElectroFinnAnalysis-konferensen som ordnades av professor Ari Ivaska i Åbo år 1988.

verförare (Bobacka et al., 2008). Dessa framsteg inom analytisk kemi baserar sig i hög grad på framsteg inom materialforskning och elektrokemi.

3. Elektrokemi och elektrokemiska sensorer

Elektrokemi spelar för närvarande en avgörande roll i mänsklighetens strävan mot en hållbar framtid. Betydelsen av elektrokemi blir allt viktigare som en följd av den pågående elektrifieringen av vårt samhälle. En hållbar energiproduktion med hjälp av sol och vind, är i hög grad beroende av elektrokemiska system, såsom solceller, elektrolysörer, bränsleceller och batterier. Vårt moderna samhälle är redan nu kraftigt beroende av elektrokemi i form

av bl.a. uppladdningsbara batterier för allehanda apparater, såsom mobiltelefoner och bärbara datorer. Den gröna övergången skapar ett allt större behov av expertis inom elektrokemi.

Även många kemiska sensorer baseras på elektrokemiska principer. Ett bra exempel är biosensorer för glukos som ger information om blodsockernivån för hundratals miljoner människor som lider av diabetes. Vid sjukhus används elektrokemiska sensorer rutinmässigt som en del av automatiserade kliniska analysatorer för bestämning av elektrolyter, pH, syre och koldioxid i blodprov. Den kanske mest kända elektrokemiska sensorn är pH-elektroden, en potentiometrisk sensor som används i praktiskt taget varje kemilaboratorium runtom i världen. Denna pH-elektrod hör till gruppen jonselektiva elektroder.

4. Jonselektiva elektroder

Jonselektiva elektroder används för att selektivt bestämma koncentrationen (aktiviteten) av olika joner i vattenlösningar. De jonselektiva elektroderna kan anses härstamma från uppfinning av pH elektroden för över 100 år sedan, vilken sedan följdes av jonselektiva elektroder som är selektiva för bl.a. Li^+ , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cu^{2+} , Ag^+ , Cd^{2+} , Hg^{2+} , Pb^{2+} , NH_4^+ , CO_3^{2-} , NO_3^- , F^- och Cl^- (Mikhelson, 2013). Jonselektiva elektroder baserade på polymermembran som innehåller supramolekylära jonreceptorer (jonoforer) är de som används mest i dag (Bakker et al., 1997). Utvecklingen av

Elektrokemi spelar för närvarande en avgörande roll i mänsklighetens strävan mot en hållbar framtid.

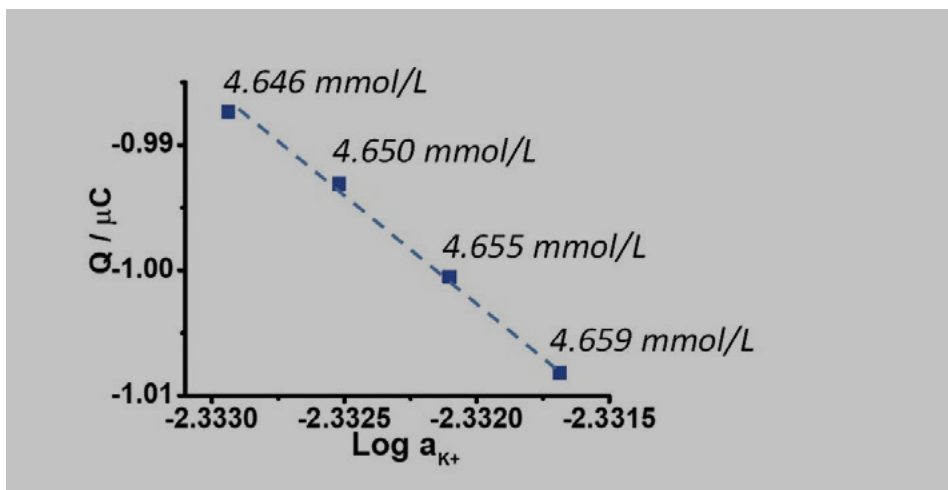
jonoforer som är selektiva för olika joner kräver organisk syntes och en god kunskap i molekylär växelverkan.

En genomgripande upptäckt år 1997 ledde till en dramatisk sänkning av detektionsgränsen för jonselektiva elektroder och det blev möjligt att detektera koncentrationer ända ner till 10^{-10} mol/L (Sokalski et al., 1997). Den

låga detektionsgränsen erhöles genom att i elektrodens inre lösning tillsätta en komplexbildare för primärjonen, dvs. den jon som elektroden var selektiv för. På detta sätt hölls aktiviteten av primärjonen inne i elektroden på en mycket låg nivå, vilket i sin tur förhindrade att primärjonen kontaminerade provlösningen. Den klassiska detektionsgränsen på ca 10^{-6} mol/L som uppmätts tidigare var alltså ett resultat av att den jonselektiva elektroden själv avgav den jon som man ville mäta. Denna insikt ledde till ett växande intresse för jonselektiva elektroder inom spår-elementanalys. Intensiv forskning i jonselektiva elektroder under de senaste 20 åren har även resulterat i nya sensormaterial, mera hållbara jonselektiva elektroder, nya referenselektroder, en djupare teoretisk förståelse av responsmekanismen och helt nya signalöverföringsmetoder för jonselektiva elektroder.

5. En ny signalöverföringsmetod för jonselektiva elektroder

Jonselektiva elektroder används vanligen som potentiometriska sensorer, dvs. jonaktiviteten (koncentrationen) i provet relateras till den elektriska potential (spänning) som uppmäts mellan den jonselektiva elektroden och referenselektroden när endast en försumbart liten ström går genom kretsen. Därför kallas jonselektiva elektroder även potentiometriska jonsensorer. Alternativa elektrokemiska och optiska signalöverföringsmetoder utvecklas kontinuerligt.



Figur 3. Koulometrisk respons för en K^+ -jonselektiv elektrod (Han et al., 2016).

Jonselektiva elektroder uppvisar i allmänhet ett brett linjärt koncentrationsområde från 10^{-1} till 10^{-6} mol/L och i vissa fall ända ner till 10^{-10} mol/L, eftersom den uppmätta potentialen är proportionell mot logaritmen av jonaktiviteten (enl. Nernst ekvation). Detta logaritmiska samband mellan potentialen och jonaktiviteten betyder dock att jonselektiva elektroder har en låg känslighet, dvs. inte kan detektera mycket små koncentrationskillnader.

Vi föreslog nyligen en lösning till denna fundamentala begränsning hos jonselektiva elektroder (Hupa et al., 2015). Den föreslagna metoden mäter laddning (koulometri) i stället för potential (potentiometri). Den koulometriska metoden gör det möjligt att förstärka den analytiska mätsignalen hos jonselektiva elektroder med fast kontakt och således öka känsligheten (Vanamo et al., 2016). Med hjälp av den koulometriska metoden lyckades vi

detektera en mycket liten (0.1 %) förändring i jonaktivitet, vilket framgår ur Figur 3 (Han et al., 2016). Detta exempel visar att prestandan hos jonselektiva elektroder dramatiskt kan förbättras med elektrokemiska metoder.

6. Kalibrering – en flaskhals

Klinisk analys har länge utgjort ett mycket betydande tillämpningsområde för jonselektiva elektroder, bl.a. för att bestämma elektrolyter såsom Na^+ , K^+ och Cl^- i blod, serum och plasma (Oesh et al., 1986). Inom hälso- och sjukvården utförs varje år över en miljard mätningar med jonselektiva elektroder som ingår i automatiserade analysinstrument (Bakker et al., 1997). Jonselektiva elektroder, liksom kemiska sensorer i allmänhet,

kräver tyvärr regelbunden kalibrering. I automatiska kliniska analysatorer utförs kalibreringen av de jonselektiva elektroderna helt automatiskt. En standardlösning kan analyseras mellan varje provlösning för att korrigera eventuell drift i elektroderna och mätsystemet och på detta sätt garantera att provresultatet är tillförlitligt. Behovet av regelbunden kalibrering är däremot en stor utmaning vid utvecklingen av autonoma och decentraliserade kemiska analysystem för in-situ miljöanalyser (Athavale et al., 2017) och bärbara sensorer (Gao et al., 2016).

Jonselektiva elektroder, liksom kemiska sensorer i allmänhet, kräver tyvärr regelbunden kalibrering.

7. Framtidsutsikter

Omfattande forskning pågår runt om i världen för att utveckla bärbara kemiska sensorer för personlig hälsodiagnostik och autonoma kemiska sensorer för miljöanalys. Det saknas ännu jonselektiva elektroder för ett antal viktiga anjoner, såsom bikarbonat (HCO_3^-) och vätefosfat ($\text{HPO}_4^{2-}/\text{H}_2\text{PO}_4^-$), vilka är av stor betydelse inom klinisk- och miljöanalys. Framsteg på detta område kräver grund-

läggande forskning inom supramolekylär kemi för att utveckla mera selektiva receptorer för dessa anjoner.

Kalibreringsfria kemiska sensorer, kombinerade med mikroelektronik och trådlös signalöverföring, är ett lovande koncept för tillämpningar inom decentraliserad kemisk analys. Analogt med IoT (*internet of things*) kunde man tänka sig IoC (*internet of chemical composition*). Det är redan möjligt att följa med luftkvaliteten runtom i världen i realtid via internet (World's air pollution, <https://waqi.info/#/c/0.786/-72.151/1.5z>). Genom att utveckla mera robusta kemiska sensorer kunde ett liknande IoC system utvidgas till en mera omfattande mätning av vår omgivning till förmån för människornas säkerhet och välmående.

Ett annat spännande scenario är den pågående utvecklingen av bärbara kemiska sensorer för icke-invasiv analys av biomarkörer, såsom glukos, i t.ex. svett eller vävnadsvätska. Den klassiska metoden att mäta blodsockerhalten är att ta ett blodprov från fingret och applicera provet på en engångs-biosensor (sticka) som sätts in i en glukosmätare. Allt oftare används även biosensorer som mäter glukoshalten i vävnadsvätska mer eller mindre kontinuerligt. Existerande alternativ är dock invasiva, dvs. kräver en liten nål som går genom huden eller en sensor som implanteras under huden, vilket inte är optimalt ur användarens synvinkel. Därför satsas betydande forskningsresurser runtom i världen på att utveckla icke-invasiva mätmetoder för glukos. Även Finland håller sig väl framme i denna utveckling bl.a. via företaget *GlucoModicum Oy* som kombinerar icke-invasiv provtagning av vävnadsvätska med bärbara glukos-biosensorer (Hakala et al., 2021).

Undervisningen inom analytisk kemi försöker hålla jämna steg med forskningen på området och samtidigt utbilda analytiska kemister med kunskaper som är relevanta inom samhället och industrin. Analytiska kemister behöver fortsättningsvis en god förståelse av grundprinciperna för de viktigaste klassiska och instrumentella analysmetoderna och deras olika tillämpningsområden. Provtagning och provbehandling är centrala begrepp, medan kvalitetskontroll blir allt viktigare inom kemisk analys. Forsknings- och utvecklingsuppgifter inom analytisk kemi ställer däremot mycket specifika kunskapskrav som gäller från fall till fall. Kunskaper i elektrokemi och nanoteknologi kan vara viktiga för en forskare som utvecklar kemiska sensorer medan en

annan forskare behöver specialkunskaper i organisk kemi för att syntetisera nya molekyllära receptorer. En tredje forskare kanske bidrar med kunskaper i kemometri och artificiell intelligens för att behandla mätdata, osv.

Inom vår grupp prioriterar vi elektroanalytisk kemi och kemiska (bio)sensorer, medan andra grupper fokuserar på t.ex. kromatografi eller masspektrometri. Inom undervisningen i analytisk kemi deltar vi sedan år 2015 i ett EU-finansierat (Erasmus Mundus) internationellt magisterprogram i analytisk kemi (*EACH – Excellence in Analytical Chemistry*) (Leito et al., 2019). EACH-programmet erbjuder studerande från världens alla hörn möjligheter att lära sig grunderna i analytisk kemi, metrologi, kvalitetskontroll



Figur 4. Deltagare i EACH-vinterskolan i Åbo år 2019.

och socio-ekonomiska aspekter av analytisk kemi under det första året vid universitetet i Tartu. Andra året väljer studerande mellan tre alternativ, dvs. Uppsala universitet (organisk och bioorganisk analys), Université Claude-Bernard Lyon 1 (industriell analys och processkontroll) eller Åbo Akademi (elektrokemiska sensorer). EACH programmet har hittills varit mycket framgångsrikt och populärt bland studerande (<https://each.ut.ee/EACH/>). Under åren 2017-2021 utexaminerades 86 analytiska kemister från EACH-programmet. I januari år 2019 ordnade vi den årligen återkommande EACH-vinterskolan i Åbo (Figur 4). Framtiden ser ljus ut för analytisk kemi.

Johan Bobacka

Johan Bobacka är professor i analytisk kemi vid Åbo Akademi.



Litteratur

Athavale, R., Dinkel, C., Wehrli, B., Bakker, E., Crespo, G., & Brand, A. (2017). Robust solid-contact ion selective electrodes for high-resolution in situ measurements in fresh water systems. *Environmental Science and Technology Letters*, 4, 286–291. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.7b00130>

Bakker, E., Bühlmann, P., & Pretsch, E. (1997). Carrier-based ion-selective electrodes and bulk optodes. 1. General characteristics. *Chemical Reviews*, 97, 3083–3132. <https://doi.org/10.1021/cr940394a>

Barek, J., Salzer, R., Worsfold, P. & Andersen, J. (2012). European analytical column: Analytical chemistry in Europe – Education, research, publications and conference. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 35, 1–3. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2012.03.004>

Bobacka, J., Ivaska, A., & Lewenstam, A. (2008). Potentiometric ion sensors. *Chemical Reviews*, 108, 329–351. <https://doi.org/10.1021/cr068100w>

EACH – Excellence in Analytical Chemistry. <https://each.ut.ee/EACH/>

Gao, W., Emaminejad, S., Nyein, H.Y.Y., Challa, S., Chen, K., Peck, A., Fahad, H.M., Ota, H., Shiraki, H., Kiriya, D., Lien, D.-H., Brooks, G.A., Davis, R.W., & Javey, A. (2016).

Fully integrated wearable sensor arrays for multiplexed in situ perspiration analysis. *Nature*, 529, 509–514. <https://doi.org/10.1038/nature16521>

Hakala, T.A., García Pérez, A., Wardale, M., Ruuth, I.A., Vänskä, R.T., Nurminen, T.A., Kemp, E., Boeva, Z.A., Alakoskela, J.-M., Pettersson-Fernholm, K., Hæggström, E., & Bobacka, J. (2021). Sampling of fluid through skin with magnetohydrodynamics for noninvasive glucose monitoring. *Scientific Reports*, 11, 7609. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86931-7>

Han, T., Mattinen, U., & Bobacka, J. (2019). Improving the sensitivity of solid-contact ion-selective electrodes by using coulometric signal transduction. *ACS Sensors*, 4, 900–906. <https://doi.org/10.1021/acssensors.8b01649>

Hupa, E., Vanamo, U., & Bobacka, J. (2015). Novel ion-to-electron transduction principle for solid-contact ISEs. *Electroanalysis*, 27, 591–594. <https://doi.org/10.1002/elan.201400596>

IUPAC: International union of pure and applied chemistry. (homepage accessed 27.2.2022). https://iupac.org/who-we-are/divisions/division-details/?body_code=500

Leito, I., Teearu, A., Bobacka, J., Randon, J., Bergquist, J. (2019). EACH (Excellence in Analytical Chemistry), an Erasmus Mundus

Joint Programme: progress and success, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 411, 5913–5921. <https://doi.org/10.1007/s00216-019-01988-8>

Mikhelson, K.N. (2013). *Ion-selective electrodes*. Heidelberg: Springer.

Oesh, U., Ammann, D., & Simon, W. (1986). Ion-selective membrane electrodes for clinical use. *Clinical Chemistry*, 32, 1448–1459. <https://doi.org/10.1093/clinchem/32.8.1448>


Sokalski, T., Ceresa, A., Zwickl, T., & Pretsch, E. (1997). Large improvement of the lower detection limit of ion-selective polymer membrane electrodes. *Journal of the American Chemical Society*, 119, 11347–11348. <https://doi.org/10.1021/ja972932h>

Vanamo, U., Hupa, E., Yrjänä, V., & Bobacka, J. (2016). New signal readout principle for solid-contact ion-selective electrodes. *Analytical Chemistry*, 88, 4369–4374. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.5b04800>

World's air pollution: Real-time air quality index. <https://waqi.info/#/c/0.786/-72.151/1.5z>



SUOMALAINEN TIEDEAKATEMIA
FINNISH ACADEMY OF SCIENCE AND LETTERS
ACADEMIA SCIENTIARUM FENNICA



#7

Preventing Spontaneous Preterm Birth: Insights from Genomics

Louis J. Muglia,

Nagendra Monangi,

Mikko Hallman, Kari Teramo,

Bo Jacobsson, Ge Zhang



Abstract

Mortality and morbidity due to infants being born preterm remains one of the greatest health burdens facing society.

Many factors influence the risk for spontaneous preterm birth, both genetic and environmental. To date, generally effective interventions to prevent preterm birth have not been identified.

In this paper, we discuss the impact of preterm birth and the challenges that have limited insights so far. New advances in genomics, systems biology, and population/personalized medicine show promise in overcoming previous barriers and leading to new insights and preventive treatments.

1. Introduction:

Preterm birth, defined as birth before 37 completed weeks of gestation, remains one of the greatest adverse public health outcomes globally. Preterm birth has for decades been the leading cause of infant mortality, and more recently it has been identified as the leading cause of death in children under 5 years of age (L. Liu et al., 2014). For those infants surviving preterm birth, a variety of lifelong complications are often incurred in neurologic, lung, gastrointestinal and visual function, along with compromised long-term growth (Committee on Understanding Premature Birth and Assuring Healthy Outcomes Board on Health Sciences Policy, 2006). Moreover, infants of low birth weight, whether growth restricted in utero or born early, are at increased risk for obesity, metabolic disorders, and hypertension as adults (de Boo & Harding, 2006). In addition, women experiencing a pregnancy complicated by preterm birth are themselves at increased risk for later cardiovascular disease (Lane-Cordova, Khan, Grobman, Greenland, & Shah, 2019). Clearly, the ability to prevent preterm birth would have enormous ramifications for both early and later life health.

The impact of preterm birth is widely recognized and increased funding to understand mechanisms and interventions to reduce preterm birth have been provided by several organizations including the US National Institutes of Health, the Burroughs Wellcome Fund, the March of Dimes, the Bill and Melinda Gates Foundation, amongst others. Despite this increased attention, little progress has been made in reducing the global incidence of preterm birth. Still, no generally effective

interventions exist. Initial reports and experience with progesterone or 17-alpha hydroxyprogesterone caproate supplementation for women with a high risk of preterm birth (previous preterm birth or short cervix) suggested potential therapeutic benefit (for example, (Eppic Group, 2021; Meis et al., 2003). Other evidence, though, has called these earlier findings into question and has also revealed potential adverse consequences of progesterone treatment such as the risk for cancer in the offspring of treated pregnancies (Kuon, Berger, & Rath, 2021; Murphy, Cirillo, Krigbaum, & Cohn, 2022; Norman et al., 2016).

Despite the limited ability to prevent preterm birth thus far, considerable opportunities for new mechanistic insights and potential therapies have recently emerged. In this manuscript, the challenges in research designed to reveal mechanisms leading to spontaneous preterm birth will be described. Spontaneous preterm birth accounts for approximately two-thirds of all preterm births (Muglia & Katz, 2010), with the remaining preterm birth a result of early obstetric delivery for complications of pregnancy such as preeclampsia or severe fetal growth restriction. Direct causal mechanisms may differ at various stages of spontaneous preterm birth as well, with extreme preterm birth more often association with bacterial colonization of maternal-fetal tissues as previously described (Muglia and Katz 2010). Recent advances in 'omics' approaches to human pregnancy, evolutionary biology, and personalized and population medicine in overcoming previous limitations will then be presented.

2. Challenges in Pre-term Birth Research:

Lack of Understanding for Normal Term Delivery Mechanisms

Every mammalian species displays a characteristic timing for birth that has been shaped by evolution to optimize reproductive fitness (Rokas et al., 2020). This normal timing for birth – “term” gestation – takes into account factors such as maternal and fetal size/growth, number of fetuses per pregnancy, nutritional provisioning to the fetus, optimal readiness for extrauterine life and other factors. However, for no species do we fully understand how it recognizes it is at term gestation. Is there a biologic timing mechanism or clock that starts at conception that counts off the time until birth or are there signals transmitted between the mother and fetus that serve as signposts as to where in the gestational timeline the pregnancy is? For different species, the mechanisms could ultimately be different. For example, mice need to meter an approximately 19.5 day gestational period while human gestation (from last menstrual period) is approximately 280 days. Until the mechanisms governing normal term gestation are understood, it will be difficult to determine how preterm birth disrupts the normal trajectory for the birth process (parturition) to result in too early delivery of the fetus.

Translatability of Animal Models

Advances in clinical medicine have often occurred as a consequence of insights gained from robust, translatable investigations from model organisms to humans. Pathways regulating growth, metabolism,

and neural development have preserved conservation through evolution in many of their most fundamental physiologic characteristics. What is the situation for pregnancy and parturition? The attachment and implantation of the embryo to establish pregnancy have been revealed to be a relatively conserved inflammatory process in eutherian mammals that is followed by a prolonged anti-inflammatory phase of uterine quiescence that is not experienced, for example, in marsupial pregnancy (Griffith et al., 2017). After this period of anti-inflammatory uterine quiescence, the uterine environment reverts to active inflammation again in association with initiation of uterine contractions and expulsion of the fetus. For many mammalian species, pro-inflammatory mediators such as prostaglandins cause a fall in maternal plasma progesterone (systemic progesterone withdrawal) (Bezold, Karjalainen, Hallman, Teramo, & Muglia, 2013). Progesterone is the primary endocrine signal needed to maintain uterine quiescence and the continuation of pregnancy. The drop in circulating progesterone marks the initiation of labor in rodents and ruminants. In women, however, plasma progesterone does not fall at the end of pregnancy when it is at its highest concentration. Thus, it is hypothesized that women experience “functional progesterone withdrawal” rather than systemic progesterone withdrawal, and a number of molecular mechanisms have been implicated in this process. To date, though, no definitive mechanism for functional progesterone withdrawal has been established. Further complicating the translatability of many animal models is the source of the progesterone itself. In rodent pregnancy, the progesterone is

synthesized and secreted by the maternal ovary through gestation. In human pregnancy, there is a shift from maternal ovarian to predominantly placental progesterone expression at approximately 10 weeks of gestation. Thus, very divergent mechanisms, at least on the surface, make extrapolation from usual model organisms to humans problematic.

Diverse Risk Factors for Preterm Birth

Preterm birth may be the result of impaired programming or inappropriate timing for the mechanism leading to normal term birth or arise from an adverse exposure that disrupts normal gestational control mechanisms to initiate preterm labor and delivery. To establish the role of genetic programming in parturition timing, twin and family-based studies have demonstrated that approximately 30-40% of the variation in gestational duration in humans is due to genetic factors (primarily in the maternal genome), leaving the remaining 60-70% arising from environmental exposures (Kistka et al., 2008; Plunkett et al., 2009). Numerous epidemiologic studies have shown associations of nutrition, health behaviors, socioeconomic status, maternal stress, and pregnancy associated infections or microbial communities (maternal microbiome) with risk for spontaneous preterm birth (Cobo, Kacarovsky, & Jacobsson, 2020; Goldenberg et al., 1996; Goldenberg, Culhane, Iams, & Romero, 2008). Until recently, studies typically interrogated one or a small number of risk factors at a time. Every pregnancy, however, is exposed to a spectrum of risk factors that must be integrated to determine the overall likelihood that a preterm birth will occur. Several recent collections of longitudinal

biological, demographic, and environmental exposures in pregnancy cohorts have shown the promise of these deep-phenotyping approaches to reveal new insights into adverse pregnancy outcomes, most recently, preeclampsia (Liang et al., 2020; Stelzer et al., 2021).

Incorporating human diversity into research

A recurring finding in human pregnancy is the range of preterm birth rates as a consequence of parental geographic ancestry and consideration of associations of preterm birth with race and ethnicity. Parental geographic ancestry may reflect components for genomic variation that alter birth timing. One study performed in the UK revealed shorter duration for term pregnancy in women of South Asian or African descent as compared to women of European descent (Patel, Steer, Doyle, Little, & Elliott, 2004). In considering social determinants of health and disease, the consideration of race, a social rather than biologic designation, has been repeatedly shown to be associated with preterm birth risk. Black women are at significantly increased risk for preterm birth and a nearly 4-fold increase in risk for recurrent preterm birth after accounting for many covariates such as socioeconomic status, prenatal care, and other risk factors (Kistka et al., 2007). The transgenerational consequences of structural racism and economic environment have emerged as targets for intervening and understanding health disparities across populations and must be incorporated into ongoing efforts to ensure the health and social justice (C et al., 2022; Collins, David, Prachand, & Pierce, 2003; Collins, David, Rankin, & Desireddi, 2009; Collins, Rankin, & David, 2011). Without incorporating biological,

social and environmental information and studies across diverse global cohorts, the potential to exacerbate rather than minimize health disparities may occur.

3. Opportunities:

The past decade has seen the expansion of approaches and cohorts being applied to better understand the mechanisms for normal birth timing and preterm birth. Here, we will briefly expand upon three of these areas: Evolution and Comparative Genomics; Human Multi-omics; Social Determinants – personalized and population health. We recognize that important advances that have also been made in investigations regarding the microbiome, immune system, pathogens, and bioengineering show considerable promise as well.

Evolution and Comparative Genomics

As discussed above, mammalian species have evolved divergent physiologic patterns associated with duration of gestation, optimizing reproductive fitness as a consequence of the environment occupied and pregnancy characteristics such as singleton versus multi-gestation pregnancies, maternal size, and ability to provide nutrients, circadian activity profiles and other contributors (Rokas et al., 2020). While these pregnancy differences in endocrine, immune and general strategies have historically provided barriers to translating findings from animal model systems to humans, recent advances in whole genome sequencing and comparative genomics capitalize on these differences in relating them to genome evolution and selection in the context of organismal phylogeny.

One example of a comparative genomics approach to parturition biology was provided by Plunkett et al (Plunkett et al., 2011). Because of the rapid evolution of increased brain size in humans, the hypothesis was tested that genes involved in determining gestational duration would be positively selected to ensure brain size or energetics would not exceed the ability for passage through the birth canal or limitation of overall fetal growth and development. Comparing genome sequences of humans to other primates and mammals in this study, rapid evolution of specific coding regions and conserved noncoding regions were identified as rapidly evolving along the lineage leading to modern humans. These genomic regions were then targeted to determine whether genetic variation (single nucleotide polymorphisms, SNPs) would associate with risk for preterm birth. In this way, *FSHR*, encoding the follicle stimulating hormone receptor was identified as a risk locus for preterm birth.

As reviewed recently, the expansion of sequenced mammalian genomes also provides other opportunities to exploit comparative genomics for new insights into birth timing (Rokas et al., 2020). By comparing more closely related species with different parturition patterns, genomic differences are likely to be more reflective on influences on reproduction and birth timing as opposed to more broad influences on genome evolution such as metabolic/nutritional regulation, pathogen exposures and immune system evolution, organism size and lifespan, as well as other life history traits. As one example, the spiny mouse (*Acomys carihinus*), Mongolian gerbil (*Meriones unguiculatus*), and house mouse (*Mus musculus*) diverged

phylogenetically over the last 18–24 million years. Surprisingly, the spiny mouse has a pregnancy of 39 days and delivers precocial (relatively mature) pups, while house mice and Mongolian gerbils have much shorter pregnancies of 19.3 days and 25 days, respectively, and deliver altricial (relatively immature) neonates. We postulate that comparative genomic analysis in these closely related species are likely to elucidate the gene selection resulting in the longer gestation of the spiny mouse. The function of these genes could be then analyzed in these organisms and used to formulate subsequent studies to determine their relevance to human pregnancy. Whether directly translatable to humans or not, the insight into control of gestational duration would be of substantial biological interest.

Human Multi-Omics

With the advent of genome-wide association studies, transcriptomics, proteomics, metabolomics, metagenomics and systems biological and artificial/machine learning advances, new genes and biomarkers associated with gestational duration or risk for preterm birth have been revealed (Zhang et al., 2018). Perhaps the longest standing of these approaches have been candidate gene association studies where common variants in plausible contributory pathways were interrogated for associations with preterm birth. As has been reviewed extensively elsewhere (Bezold et al., 2013; Plunkett & Muglia, 2008), candidate gene studies proved uninformative, with initial suggestive associations consistently unable to be replicated. Initial genome-wide association studies (GWAS), taking a hypothesis-free approach to detect associations across the genome, similarly

did not reveal associations despite the previous evidence of genetics contributing 30–40% of the risk for preterm birth. In this case, the GWAS were substantially underpowered to find the changes in risk conferred by common variants as they only analyzed 2000–4000 pregnancies. The first successful GWAS capitalized on pregnancy data from the direct-to-consumer genotyping company 23andMe in collaboration with genotype data from 3 Northern European cohorts comprising a discovery dataset of approximately 44,000 mothers and a replication cohort of over 8,000 mothers. In this study, six independent loci associated with gestational duration were found, 3 of which showed strong association for preterm birth risk (Zhang et al., 2017). These loci were biologically plausible, and the functional SNPs revealed have shed mechanistic insight into how they regulate birth timing by modulating estrogen responsiveness, for example, in *WNT4*. In a similar fashion, the fetal genomic locus encompassing the proinflammatory cytokine IL-1 beta, has been found to be linked to gestational duration, in this case associating more with post-term gestation than preterm birth (X. Liu et al., 2019).

Using whole-exome sequencing of families or sister pairs concordant for preterm birth to detect rare, potential more penetrant gene variants, several additional risk alleles have been identified. These include variants in *HSPAIL*, a nuclear steroid hormone receptor chaperone, the androgen receptor (*AR*), and the insulin-like growth factor 1 receptor (*IGF1R*) (Haataja et al., 2011; Huusko et al., 2018; Karjalainen et al., 2012). The GWAS and whole exome sequencing studies demonstrate the power of these

nonbiased methods to detect true risk variants in this complex disorder.

An important complement to the DNA-based studies are recent biomarker studies performing longitudinal sampling during pregnancy. These investigations, also performed in a pathway agnostic manner, have identified signatures of gestational duration and time to delivery that should prove clinically useful in the future for predicting the risk of preterm birth and possibly developing new therapeutic strategies. These biomarkers include both cell-free RNAs and circulating metabolites or proteins (Liang et al., 2020; Rasmussen et al., 2022).

Social Determinants – personalized and population health

Racism and social injustice have gained increased attention as fundamental contributors to health disparities including adverse pregnancy outcomes such as preterm birth (C et al., 2022; David & Collins, 1991; Murrell, 1996; Slaughter-Acey et al., 2016). The individual health impact of the chronic stress associated with transgenerational racism requires substantial reorientation of societal voices and leadership well beyond the healthcare system. These efforts are growing in number and impact as evidenced by prioritizing diversity, equity and inclusion globally. Incorporating social determinants of health in electronic medical record dashboards is possible, which will guide care providers in individualizing the health care that will especially be powerful as broad areas of biological factors can simultaneously be assessed and intervened (Abraham et al., 2020) (Fig. 1).

Several targets for intervention as modifiable risk factors in pregnancy have

been established and should be part of routine obstetric care for all pregnant women. These include pre-pregnancy body mass index (low BMI with the greatest risk for preterm birth), pregnancy weight gain, and interpregnancy interval (Lengyel, Ehrlich, Iams, Muglia, & DeFranco, 2017). Tracking and incorporating these factors into preventive strategies has considerable supportive evidence for impacting population attributable risk for preterm birth. Further, we hypothesize that the genetic regions we identify in our genome-wide studies that associate with preterm birth risk will be targets for epigenetic and post-transcriptional regulation that will arise from consequences of structural racism, social injustice and adverse environmental exposures including infection.

4. Summary and Future Considerations:

To make progress in the challenging area of preterm birth, new teams incorporating diverse disciplines will be advantageous. Bringing together molecular biologists, ‘omics investigators, obstetricians, pediatricians, engineers, social scientists, mathematicians, economists, and others for collaborative research planning, implementation and analysis holds tremendous promise for new insights into this long-standing problem. Taking findings in human populations beyond associations but into mechanisms will require appropriate animal models and cell-based investigations. Further, we must partner with and learn from communities of those most severely

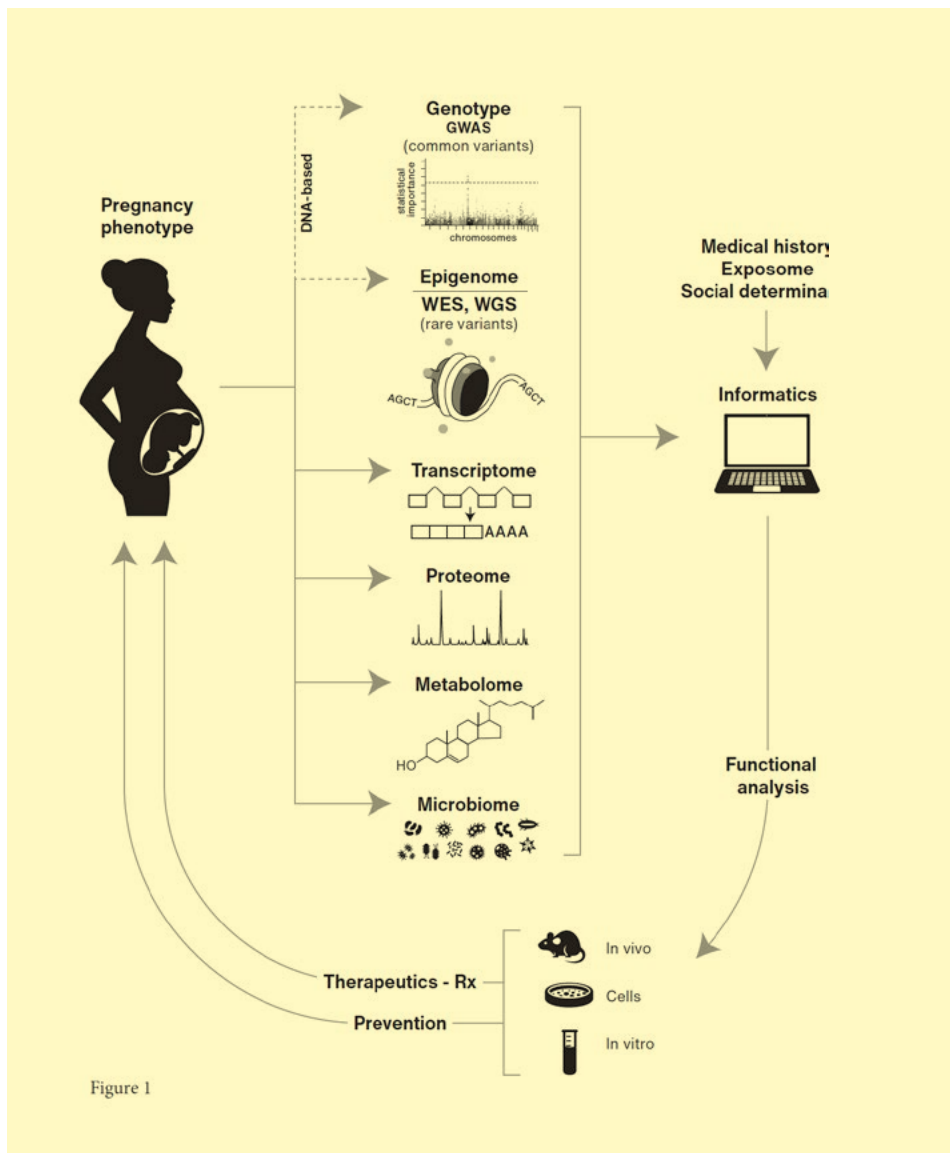


Figure 1

Figure 1. The cycle of discovery through new preventive strategies to prevent adverse pregnancy outcomes. Human populations with new technologies and omics platforms, integrated with medical history, social determinants and environmental data provide unparalleled opportunities for precision and population medicine. WES: whole-exome sequencing; WGS: whole-genome sequencing; GWAS: genome-wide association study. Reproduced with permission from (Sadovsky et al., 2020).

affected by the consequences of historical marginalization, racism, and social injustice. To accomplish this connection will require creative mechanisms of science communication as a dialogue to build trust and engagement. A great opportunity to utilize the arts to better convey scientific messages in a clear and inspiring manner is one that is gaining momentum. Ultimately, new preventive strategies will emerge from the innovative science now

being performed to impact health and social equity. Demonstrating their effectiveness and uptake during pregnancy will require public understanding and trust – a priority for progress across all of public health.

Louis J. Muglia

MD PhD, Burroughs Wellcome Fund, Cincinnati Children's Hospital Medical Center and University of Cincinnati College of Medicine, USA

Nagendra Monangi

MD, Cincinnati Children's Hospital Medical Center and University of Cincinnati College of Medicine, USA

Mikko Hallman

MD PhD, University of Oulu and Oulu University Hospital, Finland

Kari Teramo

MD PhD, Helsinki University Hospital and University of Helsinki, Finland

Bo Jacobsson

MD PhD, University of Gothenburg, Sahlgrenska University Hospital, Sweden, and Institute of Public Health, Norway

Ge Zhang

MD PhD, Cincinnati Children's Hospital Medical Center and University of Cincinnati College of Medicine, USA

References

- Abraham, A., Le, B., Kostı, I., Straub, P., Velez-Edwards, D. R., Davis, L. K., . . . Capra, J. A. (2020). Dense phenotyping from electronic health records enables machine-learning-based prediction of preterm birth. *medRxiv*, 2020.2007.2015.20154864. doi:10.1101/2020.07.15.20154864
- Bezold, K. Y., Karjalainen, M. K., Hallman, M., Teramo, K., & Muglia, L. J. (2013). The genomics of preterm birth: from animal models to human studies. *Genome Med*, 5(4), 34. doi:10.1186/gm438
- Cobo, T., Kacerovsky, M., & Jacobsson, B. (2020). Risk factors for spontaneous preterm delivery. *Int J Gynaecol Obstet*, 150(1), 17-23. doi:10.1002/ijgo.13184
- Collins, J. W., Jr., David, R. J., Prachand, N. G., & Pierce, M. L. (2003). Low birth weight across generations. *Matern Child Health J*, 7(4), 229-237.
- Collins, J. W., Jr., David, R. J., Rankin, K. M., & Desireddi, J. R. (2009). Transgenerational effect of neighborhood poverty on low birth weight among African Americans in Cook County, Illinois. *Am J Epidemiol*, 169(6), 712-717. doi:10.1093/aje/kwn402
- Committee on Understanding Premature Birth and Assuring Healthy Outcomes
Board on Health Sciences Policy (2006). *Preterm Birth: Causes, Consequences, and Prevention*. Washington, D.C.: The National Academies Press.
- Collins, J. W., Jr., Rankin, K. M., & David, R. J. (2011). African American women's lifetime upward economic mobility and preterm birth: the effect of fetal programming. *Am J Public Health*, 101(4), 714-719. doi:10.2105/AJPH.2010.195024
- David, R. J., & Collins, J. W., Jr. (1991). Bad outcomes in black babies: race or racism? *Ethn Dis*, 1(3), 236-244.
- de Boo, H. A., & Harding, J. E. (2006). The developmental origins of adult disease (Barker) hypothesis. *Aust N Z J Obstet Gynaecol*, 46(1), 4-14. doi:10.1111/j.1479-828X.2006.00506.x
- Eppic Group (2021). Evaluating Progestogens for Preventing Preterm birth International Collaborative (EPPPIC): meta-analysis of individual participant data from randomised controlled trials. *Lancet*, 397(10280), 1183-1194. doi:10.1016/S0140-6736(21)00217-8
- Giurgescu C., Misra D.P., Slaughter-Acey J.C., Gillespie S.L., Nowak A. L., Dove-Medows E., Engeland C.G., Zenk S.N., Lydic T.A., Sealy-Jefferson S., Ford J., Drury S., & Stemmer P. (2022). Neighborhoods, Racism, Stress, and Preterm Birth Among African American Women: A Review. *West J Nurs Res*, 44(1), 101-110. doi:10.1177/019394592111041165
- Goldenberg, R. L., Cliver, S. P., Mulvihill, F. X., Hickey, C. A., Hoffman, H. J., Klerman, L. V., & Johnson, M. J. (1996). Medical, psychosocial, and behavioral risk factors do not explain the increased risk for low birth weight among black women. *Am J Obstet Gynecol*, 175(5), 1317-1324.
- Goldenberg, R. L., Culhane, J. F., Iams, J. D., & Romero, R. (2008). Epidemiology and causes of preterm birth. *Lancet*, 371(9606), 75-84. doi:S0140-6736(08)60074-4 [pii] 10.1016/S0140-6736(08)60074-4
- Griffith, O. W., Chavan, A. R., Protopapas, S., Maziarz, J., Romero, R., & Wagner, G. P. (2017). Embryo implantation evolved from an ancestral inflammatory attachment reaction. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 114(32), E6566-E6575. doi:10.1073/pnas.1701129114
- Haataja, R., Karjalainen, M. K., Luukkonen, A., Teramo, K., Puttonen, H., Ojaniemi, M., . . .

- Hallman, M. (2011). Mapping a new spontaneous preterm birth susceptibility gene, IGF1R, using linkage, haplotype sharing, and association analysis. *PLoS Genet*, 7(2), e1001293. doi:10.1371/journal.pgen.1001293
- Huusko, J. M., Karjalainen, M. K., Graham, B. E., Zhang, G., Farrow, E. G., Miller, N. A., . . . Muglia, L. J. (2018). Whole exome sequencing reveals HSPA1L as a genetic risk factor for spontaneous preterm birth. *PLoS Genet*, 14(7), e1007394. doi:10.1371/journal.pgen.1007394
- Karjalainen, M. K., Huusko, J. M., Ulvila, J., Sotkasiira, J., Luukkonen, A., Teramo, K., . . . Hallman, M. (2012). A potential novel spontaneous preterm birth gene, AR, identified by linkage and association analysis of X chromosomal markers. *PLoS ONE*, 7(12), e51378. doi:10.1371/journal.pone.0051378
- Kistka, Z. A., DeFranco, E. A., Ligthart, L., Willemsen, G., Plunkett, J., Muglia, L. J., & Boomsma, D. I. (2008). Heritability of parturition timing: an extended twin design analysis. *Am J Obstet Gynecol*, 199(1), 43 e41-45. doi:S0002-9378(07)02294-6 [pii] 10.1016/j.ajog.2007.12.014
- Kistka, Z. A., Palomar, L., Lee, K. A., Boslaugh, S. E., Wangler, M. F., Cole, F. S., . . . Muglia, L. J. (2007). Racial disparity in the frequency of recurrence of preterm birth. *Am J Obstet Gynecol*, 196(2), 131 e131-136. doi:10.1016/j.ajog.2006.06.093
- Kuon, R. J., Berger, R., & Rath, W. (2021). 17-Hydroxyprogesterone Caproate for the Prevention of Recurrent Preterm Birth - A Systematic Review and Meta-analysis Taking into Account the PROLONG Trial. *Geburtshilfe Frauenheilkd*, 81(1), 61-69. doi:10.1055/a-1295-0752
- Lane-Cordova, A. D., Khan, S. S., Grobman, W. A., Greenland, P., & Shah, S. J. (2019). Long-Term Cardiovascular Risks Associated With Adverse Pregnancy Outcomes: JACC Review Topic of the Week. *J Am Coll Cardiol*, 73(16), 2106-2116. doi:10.1016/j.jacc.2018.12.092
- Lengyel, C. S., Ehrlich, S., Iams, J. D., Muglia, L. J., & DeFranco, E. A. (2017). Effect of Modifiable Risk Factors on Preterm Birth: A Population Based-Cohort. *Matern Child Health J*, 21(4), 777-785. doi:10.1007/s10995-016-2169-8
- Liang, L., Rasmussen, M. H., Piening, B., Shen, X., Chen, S., Rost, H., . . . Melbye, M. (2020). Metabolic Dynamics and Prediction of Gestational Age and Time to Delivery in Pregnant Women. *Cell*, 181(7), 1680-1692 e1615. doi:10.1016/j.cell.2020.05.002
- Liu, L., Oza, S., Hogan, D., Perin, J., Rudan, I., Lawn, J. E., . . . Black, R. E. (2014). Global, regional, and national causes of child mortality in 2000-13, with projections to inform post-2015 priorities: an updated systematic analysis. *Lancet*. doi:10.1016/S0140-6736(14)61698-6
- Liu, X., Helenius, D., Skotte, L., Beaumont, R. N., Wielscher, M., Geller, F., . . . Feenstra, B. (2019). Variants in the fetal genome near pro-inflammatory cytokine genes on 2q13 associate with gestational duration. *Nat Commun*, 10(1), 3927. doi:10.1038/s41467-019-11881-8
- Meis, P. J., Klebanoff, M., Thom, E., Dombrowski, M. P., Sibai, B., Moawad, A. H., . . . Gabbe, S. (2003). Prevention of recurrent preterm delivery by 17 alpha-hydroxyprogesterone caproate. *N Engl J Med*, 348(24), 2379-2385.
- Muglia, L. J., & Katz, M. (2010). The enigma of spontaneous preterm birth. *N Engl J Med*, 362(6), 529-535. doi:362/6/529 [pii] 10.1056/NEJMra0904308
- Murphy, C. C., Cirillo, P. M., Krigbaum, N. Y., & Cohn, B. A. (2022). In utero exposure to 17alpha-hydroxyprogesterone caproate and risk of cancer in offspring. *Am J Obstet Gynecol*, 226(1), 132 e131-132 e114. doi:10.1016/j.ajog.2021.10.035

Murrell, N. L. (1996). Stress, self-esteem, and racism: relationships with low birth weight and preterm delivery in African American women. *J Natl Black Nurses Assoc*, 8(1), 45-53.

Norman, J. E., Marlow, N., Messow, C. M., Shennan, A., Bennett, P. R., Thornton, S., . . . group, O. s. (2016). Vaginal progesterone prophylaxis for preterm birth (the OPPTIMUM study): a multicentre, randomised, double-blind trial. *Lancet*, 387(10033), 2106-2116. doi:10.1016/S0140-6736(16)00350-0

Patel, R. R., Steer, P., Doyle, P., Little, M. P., & Elliott, P. (2004). Does gestation vary by ethnic group? A London-based study of over 122,000 pregnancies with spontaneous onset of labour. *Int J Epidemiol*, 33(1), 107-113. doi:10.1093/ije/dyg238

Plunkett, J., Doniger, S., Orabona, G., Morgan, T., Haataja, R., Hallman, M., . . . Muglia, L. (2011). An evolutionary genomic approach to identify genes involved in human birth timing. *PLoS Genet*, 7(4), e1001365. doi:10.1371/journal.pgen.1001365

Plunkett, J., Feitosa, M. F., Trusgnich, M., Wangler, M. F., Palomar, L., Kistka, Z. A., . . . Muglia, L. J. (2009). Mother's genome or maternally-inherited genes acting in the fetus influence gestational age in familial preterm

birth. *Hum Hered*, 68(3), 209-219. doi:10.1159/000224641

Plunkett, J., & Muglia, L. J. (2008). Genetic contributions to preterm birth: implications from epidemiological and genetic association studies. *Ann Med*, 40(3), 167-195. doi:791840773 [pii] 10.1080/07853890701806181

Rasmussen, M., Reddy, M., Nolan, R., Camunas-Soler, J., Khodursky, A., Scheller, N. M., . . . McElrath, T. F. (2022). RNA profiles reveal signatures of future health and disease in pregnancy. *Nature*, 601(7893), 422-427. doi:10.1038/s41586-021-04249-w

Rokas, A., Mesiano, S., Tamam, O., LaBella, A., Zhang, G., & Muglia, L. (2020). Developing a theoretical evolutionary framework to solve the mystery of parturition initiation. *Elife*, 9. doi:10.7554/elife.58343

Sadovsky, Y., Mesiano, S., Burton, G. J., Lampl, M., Murray, J. C., Freathy, R. M., . . . Burroughs Wellcome Fund Pregnancy Think Tank Working, G. (2020). Advancing human health in the decade ahead: pregnancy as a key window for discovery: A Burroughs Wellcome Fund Pregnancy Think Tank. *Am J Obstet Gynecol*, 223(3), 312-321. doi:10.1016/j.ajog.2020.06.031

Slaughter-Acey, J. C., Sealy-Jefferson, S., Helmkamp, L., Caldwell, C. H., Osypuk, T. L., Platt, R. W., . . . Misra, D. P. (2016). Racism in the form of micro aggressions and the risk of preterm birth among black women. *Ann Epidemiol*, 26(1), 7-13 e11. doi:10.1016/j.annepidem.2015.10.005

Stelzer, I. A., Ghaemi, M. S., Han, X., Ando, K., Hedou, J. J., Feyaerts, D., . . . Gaudilliere, B. (2021). Integrated trajectories of the maternal metabolome, proteome, and immunome predict labor onset. *Sci Transl Med*, 13(592). doi:10.1126/scitranslmed.abd9898

Zhang, G., Feenstra, B., Bacelis, J., Liu, X., Muglia, L. M., Juodakis, J., . . . Muglia, L. J. (2017). Genetic Associations with Gestational Duration and Spontaneous Preterm Birth. *N Engl J Med*, 377(12), 1156-1167. doi:10.1056/NEJMoa1612665

Zhang, G., Srivastava, A., Bacelis, J., Juodakis, J., Jacobsson, B., & Muglia, L. J. (2018). Genetic studies of gestational duration and preterm birth. *Best Pract Res Clin Obstet Gynaecol*, 52, 33-47. doi:10.1016/j.bpobgyn.2018.05.003



SUOMALAINEN TIEDEAKATEMIA
FINNISH ACADEMY OF SCIENCE AND LETTERS
ACADEMIA SCIENTIARUM FENNICA



#8

Acid sulfate soils: A challenge for environmental sustainability

Markku Yli-Halla



Abstract

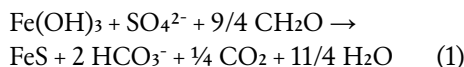
Acid sulfate (AS) soils contain sulfidic compounds formed in anaerobic conditions. In aerobic conditions, they will oxidize to sulfuric acid, which commonly lowers the pH to 3 – 4. These soils cover approximately 10,000 km² in Finland, mainly on the western coast, and over 170,000 km² globally. Acidity and the metals dissolved from the soil matrix and leached out of the soil are serious threats to aquatic biota. Initially, AS soils were regarded as an exclusively agricultural problem, but since the 1970s nearly all studies of AS soils have been environmentally motivated. Awareness of these soils has also risen in forestry, peat mining, and in engineering projects. Liming and water management are the key methods toward the sustainable use of these soils.

1. Processes in acid sulfate soils

Acid sulfate (AS) soils contain or have contained sulfidic material that can cause severe soil acidification. They are typically formed in the sediments of shallow waters along sea coasts throughout the world. A rough estimate of their global area is over 170,000 km² (Andrisse & Mensvoort, 2006) which is probably a strong underestimation (Fitzpatrick et al., 2010). These soils are particularly common in wet coastal areas of the Tropics, most prominently in Southeast Asia, in West Africa, on almost all coasts of Australia, and in the Caribbean. In the USA, most of these soils are recorded in Maryland and Virginia. In Europe, AS soils were first recognized in the Netherlands but they cover the largest area in the Baltic Basin, particularly in Finland (Purokoski, 1959; Puustinen et al., 1994; Åström & Björklund, 1995; Yli-Halla et al., 1999) but also in Sweden (Öborn, 1989) and Denmark (Madsen et al., 1985).

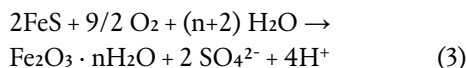
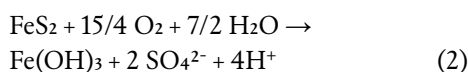
Prerequisites for the accumulation of sulfidic material are 1) sulfate (SO₄²⁻-S), abundant in the sea water; 2) fresh organic matter (OM), commonly originating from reeds or mangrove vegetation along the coastline; 3) heterotrophic microbes that can utilize sulfate as their electron acceptor while using OM for energy and carbon; 4) reducing conditions in water-logged environments; and 5) soluble iron (Fe²⁺), mobilized from the soil material in reduced conditions (Dent, 1986). Sulfate is reduced to hydrogen sulfide (H₂S) which reacts with Fe²⁺ and causes the precipitation and accumulation of iron monosulfide (FeS) in the sediment. These reactions are summarized in the equation

below, where CH₂O stands for OM:



Over time, monosulfide is at least partially converted to pyrite (FeS₂). In Finland, the accumulation of sulfidic material took place particularly during the Litorina period (approximately 7,500 – 4,000 years ago), when the temperature and SO₄²⁻ concentration in the sea water were higher than today. Sulfidic material is still forming on the reedy coasts of Finland.

Sulfidic material is stable in water-logged conditions, and the pH of a water-logged sulfidic sediment or soil horizon varies from neutral to slightly alkaline. When exposed to atmospheric oxygen, sulfidic material is oxidized in several steps to sulfuric acid and iron hydroxide as demonstrated in the following equations (Dent, 1986):



These reactions result in a sharp decrease in pH because the bicarbonate has leached away (see Eq. 1). Soil pH of 3.5 or below firmly indicates that sulfidic material is actively oxidizing and producing sulfuric acid. Along the Finnish coasts, there are no calcareous sediments to neutralize this acidity.

When released to the soil solution, SO₄²⁻ mostly remains in the pore water and leaches out of the soil during rain and snow melt periods. Leakage from AS soils is commonly recognized as an unusually

high electrical conductivity of the discharge water. Decreased soil pH results in the dissolution of metals from the soil matrix. The dissolution of aluminum (Al), occurring abundantly in all soils in sparingly soluble forms, is particularly important. When the soil pH decreases to 4 or below, Al^{3+} will release to the soil solution. The trivalent cation Al^{3+} has a high affinity to the negatively charged sites

Over an undefined number of decades, the stock of the sulfidic material is gradually exhausted and the abundant loading of the substances decreases.

of soil particles, where it displaces other cations (e.g., Ca^{2+} and Mg^{2+}). At the initial stage of the oxidation, SO_4^{2-} in the leachate is mostly accompanied with Ca^{2+} and Mg^{2+} , displaced from the cation exchange sites by Al^{3+} . When the oxidation continues, the concentrations of Ca^{2+} and Mg^{2+} decrease and the concentration of Al^{3+} increases because the respective

horizons become increasingly saturated with Al^{3+} and depleted in exchangeable Ca^{2+} and Mg^{2+} (Hartikainen & Yli-Halla, 1986). Over an undefined number of decades, the stock of the sulfidic material is gradually exhausted and the abundant loading of the substances decreases. However, soil pH is not elevated to the original level but commonly remains around 4, no matter how much the soil is leached.

Often, AS soils are divided into three categories according to each stage of the oxidation process (Fanning & Fanning, 1989). Soils containing sulfidic material that has not yet begun to oxidize are called *potential AS soils*. Sulfidic material is currently oxidizing in *active AS soils*. Finally, *post-active AS soils* no longer contain sulfidic material, and much of their soluble oxidation products have already leached away.

The redox reactions of AS soils have consequences for the solubility and mobility of several elements in the soil. In anoxic conditions, microbial activity, boosted by fresh OM, is the driving force to decrease redox potential and consequent changes in the oxidation states of elements, particularly S and Fe. This is followed by the precipitation of new solid phases (FeS , FeS_2) in the soil/sediment matrix. Upon the introduction of atmospheric oxygen, the redox potential rises again and the oxidation of both Fe and S is launched, changing their solubility. In response to the decreased pH, several metals dissolve into the pore water, increasing the cation exchange reactions. When this system receives excess water, acidic pore water and the many solutes therein leach into the watercourses. Repeated drying and wetting cycles

(*i.e.*, recurrent oxidation and leaching) gradually deplete the sulfidic material, leaving behind an acidic soil nearly saturated with Al^{3+} , while SO_4^{2-} is transported back to the sea. Much of the Fe remains in the soil and is precipitated on the surfaces of soil aggregates.

2. Morphological features of acid sulfate soils

Remarkable morphological changes take place after the sulfidic soil material is exposed to atmospheric oxygen, resulting in spectacular color changes (Fig. 1a). Horizons containing sulfidic material are originally structureless, with no aggregates. These massive horizons are soft, with a

very low bearing capacity, but almost impermeable to water. In Finland, where the sulfidic material often contains a substantial amount of FeS, these horizons are easily recognized from their (bluish-) black color (Fig. 1b). In southern Finland, sulfidic material may be dominated by FeS_2 , resulting in grey horizons, more difficult to recognize.

After natural or artificial drainage, the soil loses water, gains consistency, and shrinks irreversibly in a process called ripening. Cracks are consequently formed because the drier material no longer fills the space it filled originally. At the earliest stage of the ripening, there are only a few cracks in the soil containing large prismatic aggregates between the cracks. However, the number of the cracks increases and the aggregates become smaller over time. As this occurs, the soil becomes increasingly permeable to water.

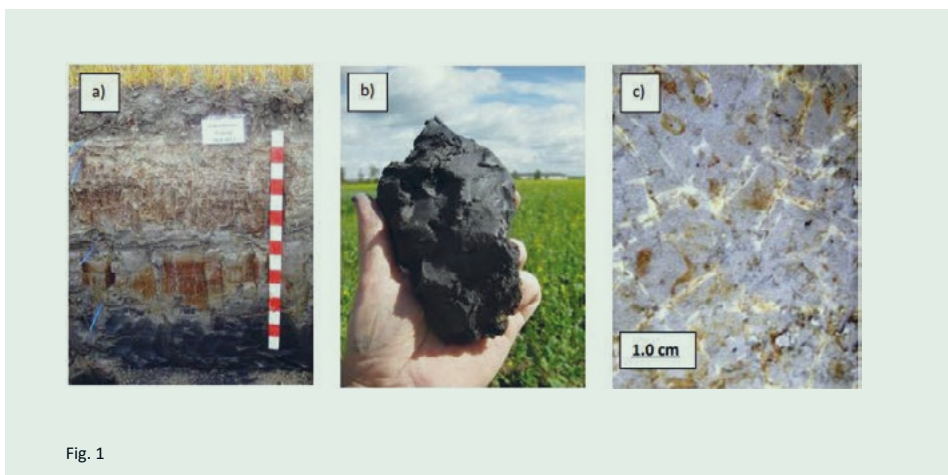


Fig. 1

Fig. 1. A typical color pattern of an AS soil from Mustasaari, containing a bluish-black reduced subsoil (below 150 cm), an oxidized horizon with many iron hydroxide coatings on the large prismatic aggregates (130–150 cm), a ripe horizon consisting of smaller aggregates with iron hydroxide coatings (30–120 cm), and a plough layer (a). The reduced subsoil can be entirely black, as in Ylistaro (b). The pale yellow color of the jarosite is typical of an oxidized horizon (c). Photos by Markku Yli-Halla.

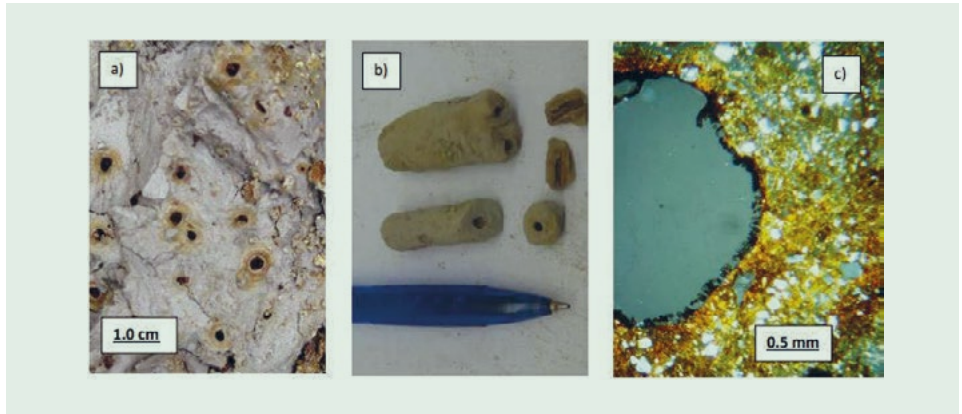
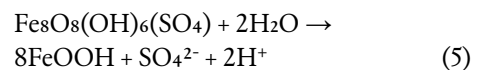
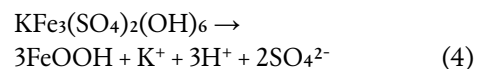


Fig. 2. Pipestems developed around the former root channels in the subsoil (a). These pipestems consist of soil material cemented by iron hydroxides (b). Root cortex cells and precipitated iron hydroxide can be seen in thin section images (c). Photos by Markku Yli-Halla (a, b) and Larry Wilding and Richard Drees, Texas A&M University (c).

The cracking allows air to enter the soil, resulting in the oxidation of the sulfidic material. Divalent Fe is also oxidized after it diffuses from reduced zones to the oxidized environment on the surfaces of the aggregates. There, it precipitates as reddish-brown oxides, which can form a uniform coating onto the aggregate surfaces (Fig. 1a). Therefore, the oxidized horizons of AS soils typically have a strong aggregate structure stabilized by rusty coatings.

Pale yellow spots are also typical of the oxidized horizons of AS soils (Fig. 1c). This color originates from jarosite, $\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$, a mineral that is an intermediate product of the oxidation. This color is diagnostic for AS soils. Jarosite is only stable in soils with a $\text{pH} < 4$. In less acidic soil horizons, it is gradually decomposed. Therefore, the presence of jarosite is a good indicator of the most acidic horizon of the soil profile. Schwertmannite, $\text{Fe}_8\text{O}_8(\text{OH})_6(\text{SO}_4)$, is another

intermediate, semi-stable product of sulfide oxidation. Both jarosite and schwertmannite are found in the AS soils of Finland. The decomposition of these minerals results in the continued release of acidity according to the following equations (Dent, 1986):



A typical feature of AS soils specifically and wet soils more generally is the formation of pipestems around former root channels (Fig. 2), which function in a similar manner as the desiccation cracks. These pipestems serve as routes for atmospheric oxygen, such that the surface of the former root channel is aerobic. Soluble Fe^{2+} oxidizes and precipitates when it diffuses from the water-logged

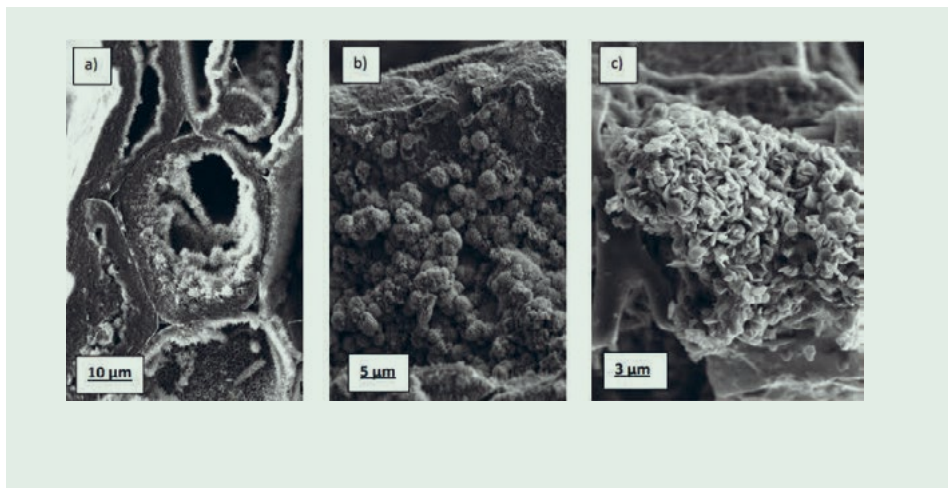


Fig. 3. Schwertmannite precipitated in former root cortex cells (a), schwertmannite precipitate (b), and jarosite, identified by the typical form of crystals (c), all in the pipestems of Ylistaro soil. Scanning electron microscope images taken by Leigh Sullivan (Southern Cross University, Australia) and Markku Yli-Halla.

interior of an aggregate to the oxidized environment near the root channel. The resulting precipitate cements the soil particles together, allowing for a strong pipe to be formed. Jarosite and schwertmannite are also commonly observed in these pipestems (Fig. 3).

3. Occurrence of acid sulfate soils

In Finland, AS soils mostly occur below the highest shore-line of the ancient Litorina Sea, which is approximately 30-50 m above the current sea level (a.c.s.l.) in southern Finland and 90-100 m a.c.s.l. in northern Finland. Sulfidic material has gradually emerged from the sea due to isostatic rebound, which has been more

pronounced in the north. Not all land between the uppermost shore of the Litorina Sea and the current coast-line consists of AS soils; rather they make up a portion of the fine-grained (silt and finer) soils in this region. Although the most extensive areas of AS soils are located along the Gulf of Bothnia, they have also been found along the southern coast (Purokoski, 1959; Puustinen et al., 1994).

Strongly acidic soils similar to the coastal AS soils can be found in locations far from the sea (e.g., Kivinen, 1944; Räisänen & Nikkarinen, 2000). In these inland soils, acidity has been found to originate from black schists containing pyrite (FeS_2). The reactions that occur in AS soils are indeed similar to those that occur in the environments where sulfidic minerals are mined, commonly associated with the acid mine drainage problems.

Fig. 4 demonstrates that the depth of

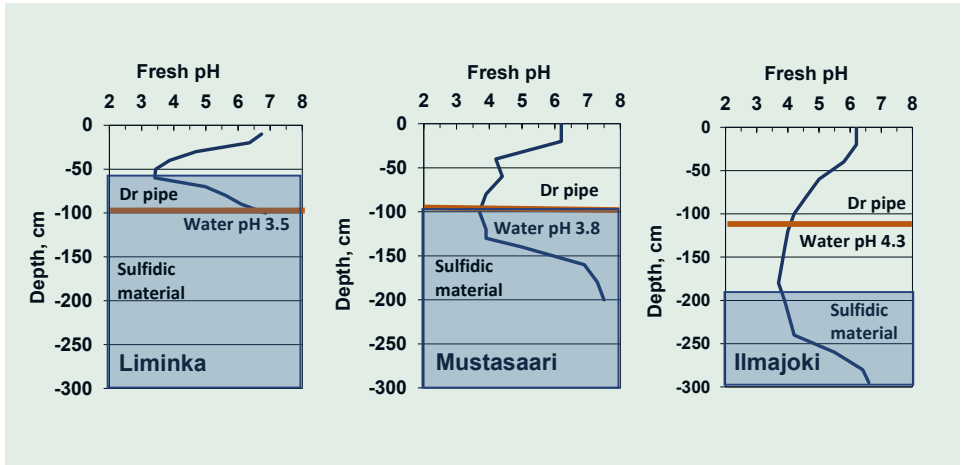


Fig. 4. Three AS soils with sulfidic material at different depths produce the discharge water with different pH values. The subsurface drainage pipes (Dr pipe) are within the sulfidic material in Liminka, at the top of the sulfidic material in Mustasaari, and well above the sulfidic material in Ilmajoki. Data sources: Joukainen and Yli-Halla, 2003 (Ilmajoki and Mustasaari); Palko, 1988 (Liminka).

the sulfidic material has an impact on the environmental loading caused by drained AS soils. In three agricultural soils, the sulfidic material was found at depths of 65 cm, 150 cm and 190 cm with average discharge water pH levels of 3.5, 3.8 and 4.3 in Liminka, Mustasaari, and Ilmajoki, respectively.

Research on AS soils in Finland began with a focus on agricultural land because crop growth suffered drastically from severe acidity in certain coastal fields (Kivinen, 1944; Purokoski 1959) where sulfidic material was apparent near the soil surface. These fields became productive farmland after liming and effective drainage. These measures elevated the topsoil pH and allowed the soluble products of sulfide oxidation to leach into watercourses.

The occurrence of sulfidic material is not limited to fine-grained soils, which are mostly reclaimed for agricultural use.

Sulfidic material is often found below peat layers because it is preserved in a reduced state in peatland environments. In peat extraction areas of Finland, sulfide concentrations of up to almost 5% have been documented in the mineral subsoil (Nystrand et al., 2021). If such a mire is drained for peat excavation, there is a substantial risk of acidification. These sulfidic materials can originate from both the sediments of the Litorina Sea and parent materials containing black schists. Additionally, AS soils can be found under forest vegetation, both in mineral soil forests and on peatlands (Nieminen et al. 2016). Wetland forestry typically involves ditching, which exposes sulfidic material to oxidation and causes acidification in the recipient waters. Only a few forest AS soils have been documented in scientific papers (Lindroos et al., 2007; Saarinen et al., 2013), but other examples can be found in reports (Weppling et al., 1999;

Auri, 2012). Furthermore, AS soils can occur in sandy environments (Mattbäck et al., 2022) where even low concentration of sulfide can reduce the pH below 4 due to a negligible buffer capacity. However, the loading potential of these soils is low, compared to finer-grained AS soils.

Extensive mapping of AS soils was recently carried out in Finland (GTK, 2020) and an estimate of about 10,000 km² for AS soils across all land uses will soon be presented (Edén et al., 2022). This estimate includes soils where sulfidic material can be found within three meters of the soil surface. Earlier, it was estimated that the agricultural soils containing sulfidic material or a pH < 4.0 within 150 cm of the soil surface cover approximately 1300 km² in Finland (Yli-Halla et al., 1999). Indeed, the estimates presented for the apparent area of AS soils are highly dependent on 1) the soil depth under investigation, 2) land uses accounted for, 3) the criteria for AS soil materials, and 4) the pH requirements.

For agricultural land use, sulfidic materials occurring at the depths deeper than two meters may be irrelevant because these layers are almost always waterlogged and thus produce negligible acid loading. International soil classification systems, such as the U.S. Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014) uses sulfidic material as a criterion for classification only when it occurs within 150 cm of soil surface because it is not considered to be harmful at greater depths. In the World Reference Base for Soil Resources (IUSS Working Group WRB, 2014), the respective depth is 200 cm. However, for engineering purposes – where the soil is often disturbed and allowed to oxidize at

greater depths – the presence of the sulfidic material deep in the soil bears an environmental risk.

4. Environmental consequences

Sulfidic material oxidizes in the summer when the groundwater level decreases. During the summer months, there is typically no discharge, meaning that the soluble products of oxidation do not leach out. The peaks of the acidity and solutes occur in the autumn, after rainwater has saturated the soil and subsurface pipes have started to convey excess water into the watercourses. Discharge decreases in the winter and then increases again in the spring, giving rise to the hazards of acidity. Sulfate does not cause low pH, but given that it originates from the same reaction as the acidity, high SO₄²⁻-S concentrations usually correlate with low pH in AS soil areas.

In rivers that receive much of their water from AS soil areas there is a risk that the river pH will decrease to levels that are harmful to aquatic biota. Aluminum dissolved by the acidity is considered the most harmful component because it precipitates in the gills of fish, causing suffocation. Fish kills are indeed the ultimate manifestation of acidic discharge and they have been reported mostly on the western coast of Finland, particularly in autumns after dry summers. They allow an intensive oxidation of the sulfidic material and subsequent leaching of acidity. In less severe cases where adult fish survive, the fish reproduction is still hampered,

reducing the fish stock and changing the species distribution (Hudd & Leskelä, 1998; Sutela & Vehanen, 2017).

When the subsurface pipe drainage of the agricultural land extended to AS soil areas on the western coast of Finland, the episodes of strong acidification began to occur more frequently. This occurred because the sulfidic subsoil is more intensively oxidized in a pipe-drained soil, as compared with the earlier drainage, which relied on the shallow open ditches. Major fish kills occurred in Finland in the early 1970s, and the most recent major occurrences were in the winter period 2006 – 2007 (Sutela et al., 2012). Land use activities resulting in the deterioration of the ecosystem have been increasing since 1600s (Hildén & Rapport, 1993), and the first recorded fish kill in Finland took place in 1843 (Åström et al., 2005). Thus, fish kills have occurred already before agricultural fields were intensively drained. Occasional fish kills have also been reported in inland watercourses induced by peat mining in black schist areas (Wichmann & Ovaskainen, 2012). Sulfidic material dredged and stockpiled on land can also cause local acidification (Johnson et al., 2022).

The dissolution of metals other than Al has also been noted to have a harmful environmental impact. While AS soils are not richer in heavy metals than other soils, the acidity promotes the solubility of the heavy metals (Sohlenius & Öborn, 2004). The pore water of AS soil has been shown to have high concentrations of heavy metals (e.g., zinc) (Lindroos et al., 2007; Yli-Halla et al., 2017). In Finland, metal leakage from AS soils is greater than that of the country's entire industry (Sundström et al., 2002). However, crops grown

in AS soils are not enriched with these metals (Fältmarsch et al., 2010) because their roots do not enter the horizons where the metals are dissolved.

5. Nitrogen content of the acid sulfate soils

More than thirty years ago (Rekolainen, 1989), the monitoring of the river water quality revealed that certain rivers in AS soil areas in western Finland exhibited unusually high concentrations of nitrogen (N). Indeed, AS soils have been found to contain large stocks of mineral N compared to other soils (Paasonen-Kivekäs & Yli-Halla, 2005; Šimek et al., 2011; Yli-Halla et al., 2022). More specifically, this N is mostly located in the subsoil in the form of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ (Fig. 5). Over a seven-year period, the monitoring of mineral AS soil in western Finland revealed that an average of 55 kg N ha^{-1} was leached annually through the subsurface drainage system (Yli-Halla et al., 2020), whereas the national average leached from agricultural land is approximately 15 kg N ha^{-1} . In this particular field, the N contained in the harvested crop plus the N contained in the discharge made up 148% of the N fertilization. Furthermore, this field produced large emissions of N to the atmosphere, indicating a substantial pool of mobile N in the soil. However, the origin, behavior, and availability to plants of this large N stock is not entirely clear.

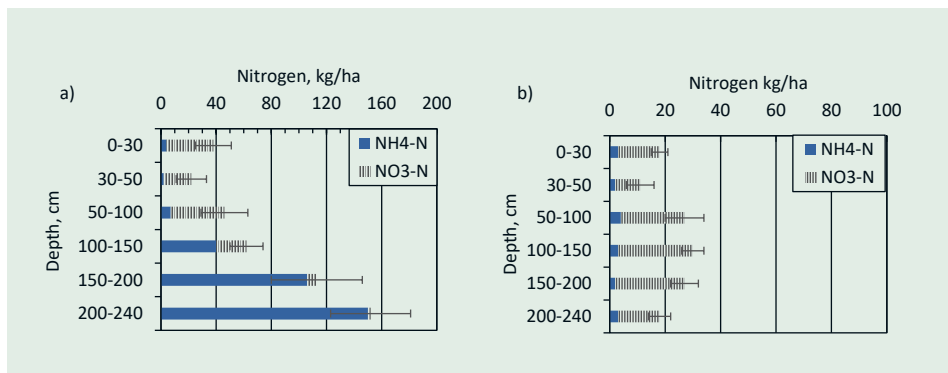


Fig. 5. Mineral nitrogen content of an AS soil (a) and an adjacent soil without AS characteristics (b) in Lapua, Finland. Observe the different scales in a) and b). Data from Pasonen-Kivekäs and Yli-Halla (2005).

6. Mitigation activities

The methods to solve the agricultural problems posed by AS soils include drainage and liming, and these recommendations were developed in the early decades of research on these soils. Since the 1970s, nearly all research on AS soils in Finland has concentrated on their environmental effects. National competence across different disciplines has gradually been built up to understand AS soil processes in the Finnish environment and establish relevant analytical and field methods to identify these soils. In particular, AS soil mapping is the basis for all mitigation activities. Large-scale maps of AS soils have been produced in small areas since the 1970s (e.g., Erviö, 1975; Palko et al., 1985; Weppling et al., 1999), and the national small-scale (1:250,000) map (GTK, 2020) provides guidance regarding where more accurate surveys are needed.

Mitigation activities have been carried out in all sectors of land use, most exten-

sively on agricultural land, and the recommendations have been compiled by the Ministry of Agriculture and Forestry and the Ministry of Environment (2012). Liming of the surface soil (Palko & Weppling, 1994; Åström et al., 2007) has been shown to have little impact on the acidity of the subsoil and drainage water. Lime filter drainage has shown a marked initial effect (Bärlund et al., 2005), albeit with a relatively short duration. Recently, liming of the subsoil by using ultrafine-grained (2.5- μm) limestone through the drainage system has been tested (Stén et al., 2019). Liming of river or ditch water has also been reviewed (Heikkinen & Alasaarela, 1988), and recommended for peat extraction areas (Hadzic et al., 2014).

Preventing further oxidation of sulfidic material by maintaining a high groundwater level is likely the most sustainable way of managing AS soils. In agricultural land, this can be facilitated by controlling drainage and pumping additional water into the drainage system (subirrigation) to prevent lowering of the groundwater level during the dry summer

months (Österholm et al., 2015). These methods of water management are shown to shorten the period during which the sulfidic subsoil is subjected to oxidation, with a slight decreasing impact on the discharge acidity (Virtanen et al., 2016). Stopping drainage of the most severe AS soils, which would practically end the agricultural land use, may seem effective from an acidification perspective. In principle, elevation of the water table into oxidized horizons should reverse the system and reintroduce reducing conditions, consuming acidity. This method appears to work in warm climates (e.g., Karimian et al., 2018), but the low temperatures in Finland makes this approach questionable. In cool soils, Fe^{3+} (abundant in the oxidized zone) is reduced to soluble Fe^{2+} . However, due to low temperatures and consequentially low microbial activity, the redox potential is not sufficiently lowered to allow the conversion of $\text{SO}_4^{2-}\text{-S}$ to S^{2-} . Therefore, instead of FeS precipitation, $\text{SO}_4^{2-}\text{-S}$ and Fe^{2+} are leached out of the soil. Upon further oxidation of Fe^{2+} in the watercourse, acidity is regenerated, thus actually transported from the soil to the watercourses (Virtanen et al., 2014). Thus, continued cultivation, controlled drainage, and subirrigation are

currently the best methods of managing agricultural AS soils.

Recently, AS soils have emerged as an issue in forest management and engineering projects involving drainage and soil disturbance. Creating awareness in these areas is essential because the AS soils have long been solely regarded as a problem of agricultural land use. A guidebook for forestry in AS soils (Nieminen et al., 2016) encourages the identification of AS soils and recommends a shallow ditching that does not extend to the sulfidic subsoil. Furthermore, guidelines for engineering projects in AS soils have recently been launched (Autiola et al., 2022) involving instructions for sampling and methods of treating sulfidic soil material.

All land use involving the disturbance and oxidation of sulfidic soil material is conducive to the loading of acidity and dissolved metals into watercourses. There is no cheap or easy solution for the proper management of AS soils. While the principal processes and consequent effects of sulfidic soil materials on soil, water, and construction materials are largely understood, much work remains in increasing awareness and developing practical solutions for the sustainable use of AS soils.

The author

Markku Yli-Halla

The author's scientific expertise consists of agricultural soil science. The author has been involved in many projects on acid sulfate soils.



Photo: Miia Collander

References

Andriessse, W. & Mensvoort, M.E.F. van (2006). Acid sulfate soils: distribution and extent. In R. Lal (Ed.), *Encyclopedia of Soil Science* (pp. 14-19). CRC Press.

Åström, M. & Björklund, A. (1995). Impact of acid sulfate soils on streamwater geochemistry in western Finland. *Journal of Geochemical Exploration*, 55, 163-170.

Åström, M., Österholm, P., Bärlund, I. & Tattari, S. (2007). Hydrochemical effects of surface liming, controlled drainage and lime-filter drainage on Boreal acid sulfate soils. *Water, Air and Soil Pollution*, 179, 107-116.

Åström, M., Sundström, R. & Holmberg, M. (2005). pH of streams in western Finland - a perspective from the Middle Ages into the mid 21st century. *Agricultural and Food Science*, 14, 5-13.

Auri, J. & Boman, A. (2012). Kiimakorpi pine bog – An example of peat covered potential acid sulfate soils. 7th International Acid Sulfate Soil Conference, Vaasa, Finland 2012. *Post-conference Excursions Guide Book* (p. 28). http://projects.gtk.fi/export/sites/projects/7iassc/post_conference_tour_guide.pdf. Accessed 14.2.2022.

Autiola, M., Suonperä, E., Suvanto, S., Napari, M., Nylund, M., Kupiainen, V., Vienonen, S., Forsman, J., Suikkanen, T., Auri, J., Boman, A. & Mattbäck, S. (2022). National guide on acid sulphate soils for construction projects. A guide to taking account of acid sulphate soils and managing their impacts (in Finnish with an English abstract). *Publications of the Ministry of the Environment 2022*, 3. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/163782>.

Bärlund, I., Tattari, S., Yli-Halla, M. & Åström, M. (2005). Measured and simulated effects of sophisticated drainage techniques on hydrology and runoff hydrochemistry in areas of boreal acid sulphate soils. *Agricultural and Food Science*, 14, 98-111.

Dent, D. (1986). Acid sulphate soils: a baseline for research and development. *ILRI Publication*, 39. International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands.

Edén, P., Boman, A., Mattbäck, S., Auri, J., Yli-Halla, M. & Österholm, P. (2022). Mapping and area of acid sulfate soils in Finland. Manuscript.

Erviö, R. (1975). Cultivated sulphate soils in the drainage basin of river Kyronjoki (In Finnish with an English abstract). *Journal of the Scientific Agricultural Society of Finland*, 47, 550-561.

Fältmarsch, R., Österholm, P. & Jacks, G. (2010). Chemical composition of cabbage (*Brassica oleracea* L. var. capitata) grown on acid sulphate soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 173, 423-433.

Fanning, D.S. & Fanning, M.C.B. (1989). *Soil morphology, genesis and classification*. John Wiley and Sons.

Fitzpatrick, R.W., Marvanek, S., Powell, B. & Grealish, G. (2010). Atlas of Australian acid sulfate soils: recent developments and future priorities. In: Gilkes, R.J. & Prakongkep, N. (Eds.), *Proceedings of the 19th World Congress of Soil Sci.; Soil Solutions for a changing World*; <http://www.iuss.org>; Symposium WG 3.1 Processes in Acid Sulfate Soil Materials; 2010 Aug 1-6. 2010. IUSS, Brisbane, Australia, pp. 24-27.

GTK, (2020). Geological Survey of Finland Acid Sulfate Soils – map services. <http://gtkdata.gtk.fi/hasu/index.html> (accessed 14.02.2022).

Hadzic, M., Postila, H., Österholm, P. et al. (2014). *Management of sulfide induced acidity in peat harvesting – Final report of the SuHe project* (in Finnish with an English summary). Reports of the Finnish Environment Institute, 17/2014.

- Hartikainen, H. & Yli-Halla, M. (1986). Oxidation-induced leaching of sulphate and cations from acid sulphate soils. *Water, Air and Soil Pollution*, 27, 1-13.
-
- Heikkinen, K., Alasaarela, E. (1988). *Neutralization of acidified lakes and running waters – A literature survey* (in Finnish with an English summary). Vesi- ja ympäristöhallinnon Julkaisuja, 18.
-
- Hilden, M. & Rapport, D. (1993). Four centuries of cumulative impacts on a Finnish river and its estuary: an ecosystem health-approach. *Journal of Aquatic Ecosystem Health*, 2, 261-275.
-
- Hudd, R. & Leskelä, A. (1998). Acidification-induced species shifts in coastal fisheries off the river Kyrönjoki, Finland: a case study. *Ambio*, 27, 535-538.
-
- IUSS Working Group WRB. (2014). World Reference Base for Soil Resources 2014. *World Soil Resources Reports*, 106. FAO, Rome.
-
- Johnson, A., Högfors-Rönholm, E., Engblom, S., Österholm, P., Åström, M. & Dopson, M. (2022). Dredging and deposition of metal sulfide rich river sediments results in rapid conversion to acid sulfate soil materials. *Science of the Total Environment*, 813, article 151864.
-
- Joukainen, S. & Yli-Halla, M. (2003). Environmental impacts and acid loads from deep sulfidic layers of two well-drained acid sulfate soils in western Finland. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 95, 297-309.
-
- Karimian, N., Johnston, S. & Burton, E. (2018). Iron and sulfur cycling in acid sulfate soil wetlands under dynamic redox conditions: A review. *Chemosphere*, 197, 803-816.
-
- Kivinen, E. (1944). Über Alaun- oder Sulfatböden (in Finnish with a German abstract). *Journal of the Scientific Agricultural Society of Finland*, 16, 147-161.
-
- Lindroos, A.-J., Derome, J., Raitio, H. & Rautio, P. (2007). Heavy metal concentrations in soil solution, soil and needles in a Norway spruce stand on an acid sulphate forest soil. *Water, Air and Soil Pollution*, 180, 155-170.
-
- Madsen, H.B., Jensen, N.H., Jakobsen, B.H. & Platou, S.W. (1985). A method for identification and mapping potentially acid sulfate soils in Jutland, Denmark. *Catena*, 12, 363-371.
-
- Mattbäck, S., Boman, A., Sandfält, A. & Österholm, P. (2022). Leaching of acid generating materials and elements from coarse- and fine-grained acid sulfate soil materials. *Journal of Geochemical Exploration*, 232, article 106880.
-
- Ministry of Agriculture and Forestry & Ministry of the Environment. (2012). Guidelines for mitigating the adverse effects of acid sulphate soils in Finland until 2020. *Publications of Ministry of Agriculture and Forestry*, 2/2011. <https://mmm.fi/>
-
- Nieminen, T., Hökkä, H., Ihalainen, A., Finér, L. (2016). Metsänhoito happamalla sulfaattimailla (in Finnish). *Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus*, 12/2016. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-190-7>.
-
- Nystrand, M., Hadzic, M., Postila, H., Wichmann, A., Karppinen, A., Ihme, R. & Österholm, P. (2021). Characteristics of sulfide bearing soil materials in peat extraction areas in N-Finland. *Journal of Geochemical Exploration*, 220, article 106640.
-
- Öborn, I. (1989). Properties and classification of some acid sulfate soils in Sweden. *Geoderma*, 45, 197-219.
-
- Österholm, P., Virtanen, S., Rosendahl, R., Uusi-Kämppe, J., Ylivainio, K., Yli-Halla, M., Mäensivu, M. & Turtola, E. (2015). Groundwater management of sulfide bearing farmlands using by-pass flow prevention and subsurface irrigation. *Acta Agriculturae Scandinavica, Sect. B*, 65, Supplement 1, 110-120.
-

- Paasonen-Kivekäs, M. & Yli-Halla, M. (2005). A comparison of nitrogen and carbon reserves in acid sulphate and non acid sulphate soils in western Finland. *Agricultural and Food Science*, 14: 57-69.
- Palko, J. (1988). *Drainage and liming of acid sulphate soils in the polder of Liminka, Finland 1984-1987* (in Finnish with an English summary). Vesi- ja ympäristöhallinnon Julkaisuja, 19.
- Palko, J., Räsänen, M. & Alasaarela, E. (1985). *Happamien sulfaattimaiden esiintyminen ja vaikutus veden laatuun Sirppujoen vesistöalueella* (in Finnish). National Board of Waters, Report, 260.
- Palko, J. & Weppling, K. (1994). Lime requirement experiments in acid sulfate soils. *Acta Agriculturae Scandinavica, Sect. B*, 44, 149-156.
- Purokoski, P. (1959). Rannikkoseudun rikkipitoisista maista - Über die schwefelhaltigen Böden an der Küste Finlands (in Finnish with a German summary). *Agrogeological Publications*, 74, Helsinki, Finland.
- Puustinen, M., Merilä, E., Palko, J. & Seuna, P. (1994). *Drainage level, cultivation practices and factors affecting load on waterways in Finnish farmland* (in Finnish with an English summary). National Board of Waters and Environment, Research Report, A 196.
- Räsänen, M.-L. & Nikkarinen, M. (2000). Happamoitumisen seuraukset peltojen ravinnetilaan ja vesien laatuun mustaliuskekallioperän alueella (in Finnish). *Vesitalous*, 41(6), 9-15.
- Rekolainen, S. (1989). Phosphorus and nitrogen load from forest and agricultural areas in Finland. *Aqua Fennica*, 19, 95-107.
- Saarinen, T., Mohämmädighavam, S., Marttila, H. & Kløve, B. (2013). Impact of peatland forestry on runoff water quality in areas with sulphide-bearing sediments; how to prevent acid surges. *Forest Ecology and Management*, 293, 17-28.
- Šimek, M., Virtanen, S., Krištůfek, V. Sijojoki, A. & Yli-Halla, M. (2011). Evidence of rich microbial communities in subsoil of boreal acid sulphate soil conducive to greenhouse gas emissions. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 140, 113-122.
- Sohlenius, G. & Öborn, I. (2004). Geochemistry and partitioning of trace metals in acid sulphate soils in Sweden and Finland before and after sulphide oxidation. *Geoderma*, 122, 167-175.
- Soil Survey Staff. (2014). *Keys to Soil Taxonomy*, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Stén, P., Dalhem, K., Engblom, S., Grannas, A., Högfors-Rönholm, E., Rosendahl, R. & Österholm, P. (2019). Kemiallinen täsmäkäsittely happamilla sulfaattimailloilla (in Finnish). *Vesitalous*, 60(1), 52-57.
- Sundström, R., Åström, M. & Österholm, P. (2002). Comparison of the metal content in acid sulfate soil runoff and industrial effluents in Finland. *Environmental Science and Technology*, 36, 4269-4272.
- Sutela T. & Vehanen T. (2017). The effects of acidity and aluminium leached from acid-sulphate soils on riverine fish assemblages. *Boreal Environment Research*, 22, 385-391.
- Sutela, T., Vuori, K.-M., Louhi, P., Hovila, K., Jokela, S., Karjalainen, S.M., Keinänen, M., Rask, M., Teppo, A., Urho, L., Vehanen, T., Vuorinen, P.J. & Österholm, P. (2012). The impact of acid sulphate soils on water bodies and fish deaths in Finland (In Finnish with an English summary). *Suomen ympäristö - The Finnish Environment*, 14/2012. <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/38771> (accessed 14.2.2022).

Virtanen, S., Simojoki, A., Hartikainen, H. & Yli-Halla, M. (2014). Response of pore water Al, Fe and S concentrations to waterlogging in of a boreal acid sulphate soil profile. *Science of the Total Environment*, 485-486, 130-142.

Virtanen, S., Uusi-Kämppe, J., Österholm, P., Bonde, A., Yli-Halla, M. (2016). Potential of controlled drainage and sub-irrigation to manipulate groundwater table for mitigating acid loadings in Finnish acid sulfate soils. In: Strock, J.F. (Ed.), *Proceedings of the 10th International Drainage Symposium 7-9 September, 2016 Minneapolis, Minnesota* (pp. 308-314). American Society of Agricultural and Biological Engineers.

Weppling, K., Innanen, M. & Jokela, S. (Eds.) (1999). Life Lestijoki – managing acid sulphate soils. *WWF Finland Report*, 11.

Wichmann, A. & Ovaskainen, J. (2012). Peat production on sulfide soil: case Linnunsuo in eastern Finland. 7th International Acid Sulfate Soil Conference, Vaasa, Finland 2012. *Geological Survey of Finland, Guide*, 56, 151-152. https://tupa.gtk.fi/julkaisu/opas/op_056.pdf. Accessed 14.2.2022.

Yli-Halla, M., Puustinen, M. & Koskiahho, J. (1999). Area of cultivated acid sulfate soils in Finland. *Soil Use and Management*, 15, 62-67.

Yli-Halla, M., Virtanen, S., Regina, K., Österholm, P., Ehnvall, B. & Uusi-Kämppe, J. (2020). Nitrogen stocks and flows in an acid sulphate soil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, article 751.

Yli-Halla, M., Virtanen, S., Mäkelä, M., Simojoki, A., Hirvi, M., Innanen, S., Mäkelä, J. & Sullivan, L. (2017). Abundant stocks and mobilization of elements in boreal acid sulfate soils. *Geoderma*, 308, 333-340.

Yli-Halla, M., Lötjönen, T., Kekkonen, J., Virtanen, S., Marttila, H., Liimatainen, M., Saari, M., Mikkola, J., Suomela, R. & Joki-Tokola, E. (2022). Thickness of peat influences leaching of substances and greenhouse gas emissions from a cultivated organic soil. *Science of the Total Environment*, 806, article 150499.



SUOMALAINEN TIEDEAKATEMIA
FINNISH ACADEMY OF SCIENCE AND LETTERS
ACADEMIA SCIENTIARUM FENNICA



Suomalainen Tiedeakatemia

Finnish Academy of Science and Letters

Academia Scientiarum Fennica

Mariankatu 5 A, FIN-00170 Helsinki

e-mail acadsci@acadsci.fi

www.acadsci.fi