Dynamiques environnementales

Journal international de géosciences et de l'environnement

42 | 2018

Du glint baltique au lac Peïpous

Répartition et développement du karst en Estonie

Oliver Koit

Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/dynenviron/1669>

DOI : 10.4000/dynenviron.1669

ISSN : 2534-4358

Traduction(s) :

Distribution and development conditions of karst phenomena in Estonia - URL : <https://journals.openedition.org/dynenviron/2253> [en]

Éditeur

Presses universitaires de Bordeaux

Édition imprimée

Date de publication : 1 juillet 2018

Pagination : 48-67

ISSN : 1968-469X

Référence électronique

Oliver Koit, « Répartition et développement du karst en Estonie », *Dynamiques environnementales* [En ligne], 42 | 2018, mis en ligne le 01 juin 2019, consulté le 03 mars 2022. URL : <http://journals.openedition.org/dynenviron/1669> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/dynenviron.1669>

La revue *Dynamiques environnementales* est mise à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.

Répartition et développement du karst en Estonie

Oliver Koit

Institut d'Écologie de l'Université de Tallinn.
Uus-Sadama 5, 10120 Tallinn, Estonie.
koitoliver@gmail.com

English text p. 292

Résumé

Près de la moitié du territoire estonien repose sur des roches carbonatées du Silurien et de l'Ordovicien, qui abritent de très larges aquifères karstifiés peu profonds, lesquels constituent environ un tiers des eaux souterraines captées dans le pays annuellement. À cause des érosions glaciaires, de la courte durée de l'évolution post-glaciaire du territoire et pour d'autres raisons encore, la topographie karstique est généralement peu présente en Estonie. Malgré la relative jeunesse de la majorité des formations karstiques, la karstification est courante et affecte quotidiennement une grande partie de la population, principalement par le biais de la qualité des eaux souterraines peu profondes. De plus, le karst estonien, avec ses particularités, offre un rare aperçu de la phase initiale du processus karstique dans une topographie érodée intensivement, qui peut encore surprendre avec ses vestiges sporadiques de périodes plus anciennes. Dans cet article, un bref aperçu de la répartition et du développement du karst en Estonie est présenté.

Mots-clés

Karst, eaux souterraines, topographie de type cuesta, géomorphologie, sources, grottes.

Dynamiques Environnementales 42

Journal international des géosciences et de l'environnement
2nd semestre 2018, p. 48-67.

Introduction

L'Estonie est située dans la zone de transition des régions maritimes de la mer Baltique et des régions au climat continental [Cfb et Dfb selon la classification des climats de Köppen-Geiger (Kottek et al., 2006)], le climat frais et humide prédomine. La quantité annuelle moyenne de précipitations (727 mm) dépasse le taux moyen d'évapotranspiration (430–450 mm selon Kink, 2007) en Estonie. Ainsi, il y a un excédent important de réalimentation pour le développement

des ressources d'eaux souterraines suffisantes. Par conséquent, les eaux souterraines font partie des sources d'eau potable les plus importantes. Le contexte hydrogéologique de l'Estonie est déterminé par son emplacement dans la partie nord-ouest de la plateforme de l'Europe de l'Est. En Estonie, les zones basses de la plateforme sont composées de roches sédimentaires du Néoprotérozoïque et du Paléozoïque. Les roches carbonatées du Silurien et de l'Ordovicien affleurent sur la partie nord de la plateforme en Estonie, en formant de larges plateaux (figure 1). Les roches carbonatées étendues abritent des

Figure 1 : La carte géologique de l'Estonie, montrant les principales régions karstiques selon Kink (2006), les principales zones/sources karstiques (à partir de la base de données EE-LIS) et la géologie de la roche mère. L'auteur inclut la région karstique non répertoriée d'Adavere-Põltsamaa parmi celles distinguées par Kink (2006). La carte de base et les données géologiques fournies par le Estonian Land Board.

aquifères peu profonds, essentiellement non confinés, du système aquifère Silurien-Ordovicien, qui représentent 33 % des eaux souterraines captées dans le pays (Olesk, 2016). Tout en fournissant une source vitale d'eaux souterraines potables, les aquifères carbonatés présentent également une karstification étendue, ce qui entraîne souvent des problèmes dans la gestion de l'eau. Un bref aperçu du développement, de la répartition et des particularités du karst en Estonie est présenté dans la suite de cet article. Toutes les régions karstiques les plus importantes d'Estonie seront traitées sous l'angle de leurs caractéristiques les plus spécifiques.

Le développement et la répartition du karst en Estonie

Des glaciations répétées pendant la période du Pléistocène ont certainement entraîné la destruction de la majorité des formations karstiques pré-glaciaires. En effet, il a été estimé que les glaciers ont érodé une strate épaisse de 50-60 m de la surface de la roche mère (Makkaveyev,

1976 ; Isachenkov, 1982). Cependant, dans de nombreux cas, les formations karstiques interstadiales et même stadiales se sont sûrement développées et ont survécu (Heinsalu, 1977, 1978a, 1980, 1984, 1987 ; Karukäpp, 2005), et auraient pu former dans certains cas la base de la karstification durant l'Holocène. Cette dernière était plus susceptible de se produire près des anciennes vallées enfouies, dont on estime (Puura, 1980) qu'elles se formaient déjà durant le Paléogène tardif. Les rares apparitions de paléokarst datant du milieu de l'ère du Paléozoïque jusqu'au Paléogène et au Néogène peuvent être constatées dans les mines de schiste bitumineux au nord-est de l'Estonie et ailleurs (Heinsalu, 1977 ; Bauert, 1989 ; Pirrus, 2007 ; Söstra et Kallaste, 2008 ; Sokman et al., 2008 ; Kelp, 2014). On peut supposer que la période de karstification en cours a débuté juste après le retrait de la dernière glaciation du Pléistocène (il y a environ 10 000-14 000 ans) et la régression progressive de la mer Baltique durant l'Holocène (Pirrus, 2007). Ainsi, la plupart des karsts actifs aujourd'hui

sont assez jeunes et de taille modeste par rapport aux zones de karst les plus célèbres du monde.

La distribution spatiale et l'intensité du phénomène karstique en Estonie sont principalement contrôlées par l'ampleur des accidents tectoniques et par les caractéristiques lithologiques de la roche hôte, mais également par le type et l'épaisseur de la couverture du Quaternaire recouvrant la roche mère (Heinsalu, 1967, 1977a). Verticalement, la karstification est la plus développée à 5–10 m de profondeur mais peut atteindre 30 m dans certains cas (Heinsalu, 1967, 1977a). Dans les collines de Pandivere et dans les zones de failles tectoniques, la karstification peut atteindre des profondeurs allant jusqu'à 75 m (Bauert et Kattai, 1997 ; Karst ja allikad..., 2002). Par conséquent, la karstification ne s'est pas développée uniformément sur tous les affleurements de roches carbonatées (figure 1). En se basant sur l'importance et l'abondance du phénomène karstique, Heinsalu (1977a) et Kink (2006) ont distingué six régions karstiques en Estonie (figure 1) : Kohila, Pandivere, Kohtla-Järve, le nord du comté de Pärnu et l'archipel ouest estonien. Dans une moindre mesure, les roches carbonatées du Dévonien supérieur affleurant dans le sud-est de l'Estonie présentent de la karstification ; c'est pourquoi la région karstique du sud-est de l'Estonie a également été distinguée par Kink (2006). Bien que non différenciée auparavant, Adavere-Põltsamaa est une autre région karstique avoisinant les collines de Pandivere au sud qu'il convient de noter (région 7* dans la figure 1).

Le soulèvement néotectonique post-glaciaire et la régression de la mer Baltique durant l'Holocène ont déterminé où la karstification pouvait commencer. Ainsi, il y a probablement eu une différence notable de plusieurs milliers

d'années entre le début de la karstification du sud de l'Estonie et des collines de Pandivere par rapport aux plaines de l'ouest de l'Estonie (Heinsalu, 1977a). Par conséquent, le karst dans les plaines de l'ouest de l'Estonie et dans les îles situées à l'ouest est généralement le plus récent. Au contraire, les collines de l'ouest de Saaremaa (54,5 m au-dessus du niveau marin) avaient déjà émergé de la mer Baltique après le drainage du lac proglaciaire Baltique (Saarse et al., 2007, 2009), ce qui signifie que le karst a eu plus de temps pour se développer par rapport au reste des plaines de l'ouest de l'Estonie. Il peut également y avoir quelques exceptions particulières comme dans le cas du système karstique de Salajõe, situé au nord-est de la baie d'Haapsalu (figure 1) dans les plaines de l'ouest de l'Estonie. Le système avec une capacité de débit de 1,7 m³/s selon Heinsalu (1984) présente une reculée impressionnante de 600 m de long et jusqu'à 100 m de large et de multiples sources permanentes de niveau de base et de sources intermittentes de débordement. Comme l'altitude du système n'est que de 1 à 7 m au-dessus du niveau marin, il était encore submergé sous la mer Baltique il y a environ 2000 à 3000 ans (Saarse et al., 2003). Il s'agit donc probablement d'un exemple de système karstique qui se développe à partir d'un vestige préglaciaire.

La topographie de type cuesta et les tourbières

Dans le contexte topographique relativement plat de l'Estonie, les formations karstiques se sont généralement développées près du pied des plateaux rocheux, des escarpements, des collines et des vallées ensevelies taillées dans le roc qui fourniraient une circulation verticale cruciale pour la karstification (Heinsalu, 1977a ; Pirrus, 2005). De plus, la combinaison de la légère pente descendante vers le sud [0.15° à 0.19°

Figure 2 : Zone représentative de la région karstique de Kohila (voir Figure 1) illustrant le soulèvement néotectonique progressif de la croûte terrestre, la topographie de type cuesta et le drainage des tourbières sur le développement karstique dans le cas des zones karstiques de Tuhala et Aandu. Les flèches vertes en pointillés sur la carte symbolisent l'azimut de l'inclinaison de la croûte terrestre selon Miidel & Vaher (1997).

Le front de cuesta 1 (ligne rouge en pointillés) correspond à peu près aux formations côtières du lac proglaciaire Baltique selon Suuroja et al. (2003). Le front de cuesta 2 coïncide à peu près avec un autre escarpement qui, d'après l'altitude, pourrait correspondre au littoral de la mer de Yoldia selon Suuroja et al. (2012). Sur la base des données LIDAR de surface fournies par le Estonian Land Board, les impressions artistiques des coupes transversales sont fournies pour les zones karstiques de Tuhala (profil A-B-C) et d'Aandu (profil D-E).

selon Puura et Mardla (1972) et Puura et al. (1999)] de la strate de roche mère monoclinale, des érosions glaciaires à répétition, du soulèvement néotectonique de la croûte terrestre, des fluctuations importantes du niveau de la mer et des phénomènes côtiers durant l'Holocène a entraîné le développement et l'accentuation de la topographie de

la roche-mère de type cuesta (Tavast, 1997 ; Tuuling, 2009). Les crêtes de l'escarpement à peu près orientées vers l'E-O ou le NE-SO, dont chacune présente une paroi d'escarpement au nord plus abrupte et une pente d'inclinaison au sud plus légère, forment un système de « cascade » descendante de cuestas vers le N-NO à travers les affleurements

calcaires. Ce dernier, ainsi que d'autres formes de relief positives de roche mère, ont établi les bases topographiques du développement du karst en Estonie.

Durant l'Holocène, les conditions climatiques et la topographie plate ont favorisé la formation de tourbières en Estonie, qui se sont étendues sur environ 22 % de la surface du pays (Orru, 1992 ; Ilomets, 1997 ; Masing et al., 2000). Les tourbières, en particulier les tourbières hautes successives, joueront également un rôle important dans le développement du karst estonien durant l'Holocène. Dans un premier temps, les tourbières fourniraient une source abondante de réalimentation chimiquement agressive à la majorité des rivières karstiques (Kink et al., 1998) sur les affleurements calcaires. Plus tard, à mesure que les tourbières hautes devenaient plus épaisses, elles pouvaient aussi devenir des divisions locales ou même régionales des eaux souterraines, donnant une charge hydraulique élevée pour les zones environnantes.

Bien que n'ayant pas encore fait l'objet d'une étude détaillée, l'auteur fournit ci-après un scénario probable de la façon dont le soulèvement néotectonique de la croûte terrestre et la formation de tourbières ont affecté le développement karstique dans la topographie de type cuesta de l'Estonie. Le taux de soulèvement de la croûte terrestre [environ 3 mm par an selon Vallner et al. (1988) et Ekman (1996)] est plus élevé au NO qu'au SE de l'Estonie [de 0 à -1 mm par an selon Ekman (1996)]. Il y a donc une inclinaison progressive de la croûte terrestre perpendiculaire à l'axe d'articulation NE-SO de la plateforme (selon Miidel et Vaher, 1997, l'angle d'azimut de l'inclinaison est compris entre 130 et 155° comme le montre également la figure 2). En raison de l'inclinaison de la surface, les lacs initiaux (dans le cas de tourbières limnogènes) et les tour-

bières successives ont pu être progressivement « emprisonnés » à l'extrémité des pentes d'inclinaison S-SE des cuestas. Par conséquent, le drainage de surface initial a été contraint de franchir graduellement le front de cuesta pour atteindre leur niveau de base. Si les conditions préalables étaient favorables, le cours d'eau de surface initial développerait un réseau de drainage karstique souterrain.

Le cas des zones karstiques de Tuhala et d'Aandu situées dans la région karstique de Kohila pourrait illustrer le scénario susmentionné (figures 2, 3). Au cours des dernières années, le fonctionnement hydrologique, hydraulique et hydrochimique de la zone karstique de Tuhala a été soigneusement étudié (Koit, 2016a, 2016b ; Koit et al., 2017 ; Koit et al., 2018). La zone karstique de Tuhala comporte une vallée à la surface sèche (1 dans figure 3a) située à l'O-NO du groupe de sources permanentes actuellement actives (3 dans figure 3a). Un groupe de sources de débordement intermittentes (2 dans figure 3a) est situé entre la vallée sèche et le groupe de sources permanentes. De telles conditions sont probablement le résultat de l'inclinaison néotectonique progressive de la croûte terrestre qui a d'abord contraint le cours d'eau de surface initial (1 dans figure 3a) à rechercher progressivement un chemin de drainage plus efficace vers le niveau de base, dans la vallée de la rivière Pirita (figure 2). Par conséquent, la rivière Tuhala a trouvé un nouveau chemin de drainage grâce au système karstique (2 dans figure 3b). Au fur et à mesure que l'inclinaison s'est accentuée, le chemin d'écoulement préférentiel du karst s'est graduellement déplacé vers le NE-E jusqu'à son niveau de base actuel dans la vallée de la rivière Pirita, laissant la source principale précédente servir de source de débordement. Il est également intéressant de noter le déplacement progressif en

Figure 3 : Cartes du scénario de développement proposé pour les zones karstiques de Tuhala (a) et d'Aandu (b) dans la région karstique de Kohila. Leurs emplacements et leurs étendues sont notés avec des cases blanches sur la figure 2. Les deux zones karstiques présentent des vallées sèches en surface qui auraient pu être les premières voies de drainage principales au début du développement du karst dans la zone. En raison de l'inclinaison croissante de la croûte terrestre, les deux cours d'eau ont développé un réseau de drainage karstique permettant d'atteindre le niveau de base régionale représenté par le substratum rocheux enterré des vallées des rivières Pirita et Keila situées au Nord-Est des systèmes. Le fond de carte est fourni par l'Estonian Land Board.

amont du puits principal du système (figures 3a, 4).

Bien que n'ayant pas fait l'objet d'une étude détaillée, la zone karstique d'Aandu (figure 3b) située à environ 14 km à l'O-SO de Tuhala, présente des caractéristiques similaires à la zone karstique de Tuhala d'après les observations à distance et sur le terrain. Tout d'abord, il y a la célèbre vallée sèche avec des sources d'écoulement dans la partie aval (1 dans figure 3b ; figure 4). Tout comme dans la zone karstique de Tuhala, le drainage karstique principal s'est déplacé vers le niveau de base local au NE en raison de l'inclinaison progressive de la croûte terrestre (2 dans figure 3b). Il est donc raisonnable de supposer que des forces similaires par rapport à la zone karstique de Tuhala ont généralement affecté le développement de la zone karstique d'Aandu.

Les collines de Pandivere - le saint-Graal du karst estonien

Les collines de Pandivere (avec une hauteur maximale de 166 m au-dessus du niveau marin) sont l'une des régions les plus karstifiées de l'Estonie (Figure 1) (Heinsalu, 1963a, 1967, 1977a). Il y a plus de 350 occurrences documentées de karst dans les collines, le plus souvent des dolines, des reculées et des sources (Karst ja allikad..., 1994). Le karst dans les collines s'est vraisemblablement formé sur les vestiges préglaciaires. Les tourbières n'ont pas eu une incidence aussi importante sur le développement du karst durant l'Holocène dans les collines qu'en Basse Estonie. Une roche mère très fracturée et karstifiée, une couverture mince du Quaternaire, une altitude relative élevée et une zone vadose épaisse sont favorables à une infiltration intensive des précipitations et des eaux de surface. Ainsi,

Figure 4 : Un marais printanier dans la partie aval de la vallée sèche du système karstique d'Aandu.

il y a très peu de rivières de surface, de lacs et de tourbières dans la partie centrale des collines, couvrant une surface d'environ 1375 km² (Pandivere..., 2006). Cependant, la particularité des collines est l'incidence élevée de lacs karstiques intermittents formant parfois des séquences complexes de systèmes reliés hydrauliquement comme les lacs karstiques intermittents de Jalgsema, Assamalla, Võhmetu-Lemküla-Porkuni, Saksi, Roosna et Savalduma (figure 5) (Joonuks, 1974).

Les collines de Pandivere constituent une importante division des eaux souterraines régionales, couvrant une superficie d'environ 5440 km² (Eipre, 1987). L'infiltration est rapidement transférée vers les ceintures d'importantes sources de débordement et d'écoulement entourant les collines. Il y a plus de 200 sources ou groupes de sources riches en eau répartis sur trois zones à différentes altitudes sur les pentes des collines de Pandivere (Heinsalu, 1977b). Au total, ces sources principalement autogènes rejettent environ 250 millions de m³ d'eaux souterraines par an (Aruja et al., 1976). De plus, ces sources riches en eau forment les têtes de bassin d'un

grand nombre de rivières majeures de l'Estonie du nord.

Au contraire, de bonnes conditions de drainage dans les collines favorisent également les activités agricoles intensives. En raison de l'utilisation généralisée des engrais et des pesticides, les valeurs-seuils de sécurité pour les contaminants agricoles dans les eaux souterraines peu profondes des aquifères carbonatés karstifiés sont très souvent dépassées (Aruja et al., 1976 ; Leisk, 2017 ; Leisk et Rebane, 2018). Afin de mettre en place des mesures spéciales de protection de l'eau pour faire face à la pollution agricole dans les collines, la Zone Vulnérable aux Nitrates de Pandivere et d'Adavere-Põltsamaa a été créée en 2003 (Pandivere..., 2006). Bien que la gestion des eaux usées domestiques dans les collines se soit beaucoup améliorée depuis le retour à l'indépendance de l'Estonie en 1991, elle présente toujours des défis en raison des conditions hydrogéologiques complexes et du traitement inefficace des eaux usées dans les petites villes et les villages dispersés (figure 5) (Koit et Vainu, 2017).

Figure 5 : Le lac karstique de Savalduma au cœur de la région karstique de Pandivere. Le lac reçoit des eaux usées mal traitées de la ville voisine de Tamsalu depuis près de 50 ans.

Le karst technogénique dans la région karstique de Kohtla-Järve

La région karstique de Kohtla-Järve qui coïncide avec la région montagneuse de Jõhvi (81 m au-dessus du niveau marin) (figure 1) dans le nord-est de l'Estonie a aussi rencontré un impact anthropique important. Au moins 49 apparitions de karst ont été recensées dans la région et sont communément associées avec les nombreuses zones de failles rencontrées dans la roche mère (Heinsalu, 1977a, 1978b ; Kink, 1997). Dans la région, les schistes bitumineux ont été minés à la surface et sous la surface pendant plus de 100 ans. Les activités minières ont été accompagnées par le pompage et le drainage intensifs des aquifères carbonatés peu profonds accueillant les schistes bitumineux, ainsi que par un effondrement des chambres de mines abandonnées, par une modification importante de la topographie de la surface et par une altération du réseau hydrographique (Bauert et Kattai, 1997 ; Perens et Vallner, 1997 ; Toomik et Liblik, 1998 ; Gavrilova et al., 2005 ; Perens et al., 2006).

Des décennies de minage ont nui à l'hydrodynamique naturelle de la surface de l'eau et des aquifères carbonatés peu profonds de la région de Kohtla-Järve, provoquant la formation du karst prétendument anthropique ou technogénique (Gavrilova et al., 2005 ; Perens et al., 2006). Un exemple typique du karst technogénique pendant la phase de minage est l'assèchement des sources karstiques et des courants à la surface (Heinsalu, 1978b). Quand le drainage est arrêté, la combinaison du niveau de la nappe phréatique en récupération et de l'inondation progressive du réseau étendu des mines souterraines avec des surcharges fissurées et fragilisées peut mener à l'apparition de dolines d'effondrement à la surface, d'une porosité secondaire et tertiaire accentuée de façon anthropique et de nombreuses sources de débordement spontanées et artificielles (Sepp, 2017).

Des décennies d'eaux d'exhaure et de déversement des eaux usées des industries dans les plans d'eau et dans les aquifères peu profonds ont nui à l'hydrochimie des eaux de la région (Vallner et Sepp 1993 ; Gavrilova et al., 2005). Bien que située juste en dehors de la frontière ouest de la région karstique de

Figure 6 : Couche bitumineuse solide dans le bas du ponor d'Uhaku résultant de décennies de déversement des eaux usées de l'industrie du schiste bitumineux (Photo : Blaž Kogovšek).

Kohtla-Järve, le bassin versant de la rivière Purtse montre l'impact de l'industrie du schiste bitumineux. Depuis le début du 20^e siècle, la rivière Purtse et ses affluents ont reçu l'exhaure, les eaux usées non traitées venant de l'industrie du schiste bitumineux et des lixiviats provenant des décharges de semi-coke (Jürgenson, 1958 ; Pahkla, 1969 ; Gavrilova et al., 2005 ; Tamm, 2008). Un affluent nommé rivière Erra pénètre en fin de course dans le système karstique Uhalu (figure 1) dans son cours inférieur, pour se déverser dans la rivière Purtse, à 400 m à l'est du puits. Un autre affluent de la rivière Purtse, la rivière Kohtla, est aussi connu pour sa perte d'eau vers les mines souterraines de Kohtla (Heinsalu, 1978b) au travers de nombreux ponors. Comme la pollution dans les courants à la surface est restée pendant des décennies (figure 6) (Tamm, 2008), on peut supposer qu'une quantité inconnue de déchets déversés dans les aquifères peu profonds en passant à travers les ponors ont été préservés jusqu'à ce jour.

La région karstique de Kohila

La zone qui couvre près de 2700 km² du plateau Harju qui entoure Kohila est la région la plus karstifiée dans l'ouest de l'Estonie (figure 1). La région est caractérisée par la présence de nombreuses collines de roche mère, de fronts de cuesta et de vallées de roche mère souterraines. Les espaces inférieurs entre les modelés en relief accueillent souvent les tourbières qui fournissent les nombreuses zones karstiques avec la réalimentation comme décrite ci-dessus. Par conséquent, dans la région karstique de Kohila, les systèmes karstiques de type cuesta-soulevé-tourbière sont répandus. Cette dernière est aussi caractérisée par l'abondance de groupes de sources de débordement intermittentes des systèmes karstiques causés par les changements progressifs du niveau de base (Bakalowicz, 2005). Au total, plusieurs centaines d'apparitions de karst ont été recensées dans la région (Heinsalu, 1977a ; Kink, 1997). La région comprend les zones karstiques d'Aandu (figures 2, 3b, 4, 7), Hageri, Kuivajõe,

Figure 7 : Le ponor principal dans la reculée de la zone karstique d'Aandu.

Kuimetsa, Kurevere, Pae et Palamul-
la dont les zones karstiques de Tuhala
(figures 2, 3a) et Kadaka, mentionnées
précédemment (Koit, 2014, 2015), ont
fait l'objet d'études plus approfondies
ces dernières années (figure 1).

Grottes karstiques

Par chance, la région karstique de
Kohila comprend aussi la majorité des
grottes karstiques connues [24 grottes
karstiques selon Heinsalu (1977a)] en
Estonie. Les grottes karstiques esto-
niennes se développent majoritairement
le long de l'intersection des joints et des
plans de stratification. À cause de la
stratification homocline presque plate,
les grottes présentent habituellement
des profils en long presque horizontaux.
Comme les lits les plus argileux « enca-
drent » souvent les lits les plus solubles
situés dans les grottes, ceux-ci pré-
sentent communément des profils croi-
sés rectangulaires bas (jusqu'à 2,5 m
de hauteur) et larges (jusqu'à 12 m
de large) (figure 8). Contrôlées par les
joints, les sections allongées vertica-
lement des grottes peuvent atteindre
jusqu'à 4,4 m de hauteur ou plus (Hein-
salu, 1977a). En raison de leur proximi-
té avec la nappe phréatique, les grottes

estoniennes présentent généralement
des éléments de grottes phréatiques
et vadoses. Par conséquent, selon les
conditions hydrologiques, elles peuvent
être complètement submergées, en par-
tie inondées ou sèches.

Les zones karstiques de Tuhala, Kui-
metsa et Pae (figure 1) possèdent les
grottes karstiques les plus connues
d'Estonie. Le passage principal de la
grotte Virulase (figure 8) dans la zone
karstique de Tuhala est connu pour me-
surer au moins 58 m de long (Palumets
et Proosa, 2003). Après l'effondrement
d'une doline de suffosion en 1973 près
du ponor principal du système karstique
de Tuhala, une nouvelle grotte a fait son
apparition. La grotte découverte pos-
sède une section verticale de 4,4 m de
haut allant jusqu'à 1,6 m de largeur et
praticable sur 5 m de longueur (Maastik,
1973). Cela signifie que les sections do-
minées par des caractéristiques horizon-
tales et verticales se forment simulta-
nément si les conditions préalables sont
remplies.

Il existe au moins douze grottes ka-
rstiques recensées dans la zone karst-
ique de Kuimetsa (figure 1) (Heinsa-
lu, 1963b, 1987) dont au moins neuf

Figure 8 : Une section contrôlée par un plan de stratification rectangulaire dans la grotte karstique de Virulase dans la zone karstique de Tuhala.

d'entre elles peuvent être explorées. Toutes les grottes qui sont accessibles semblent faire partie d'un même système de grottes plus grand. Officieusement, la plus longue partie accessible du système Kuimetsa est appelée « Suur koobas » ou « Grande grotte » qui comporte un passage principal de 80 m de long. La « Grande grotte » de Kuimetsa s'est développé le long des joints verticaux dans des roches carbonatées épaisses et très solubles jusqu'à des pierres stratifiées imposantes de l'étage Hirnantien. Elles sont structurellement supportées par l'importante stratification. Dans le contexte estonien, les dimensions de la grotte sont remarquables : jusqu'à 12 m de large et dans certains cas plus de 4-5 m de hauteur dans les sections contrôlées par le joint de la grotte (figure 9).

Rivières secrètes

Les grottes karstiques actives et les systèmes de conduits fournissent des voies d'écoulement pour les courants karstiques souterrains, qui selon les

contes populaires estoniens sont souvent mentionnés comme des prétendues « rivières secrètes ». Environ 40 à 50 pertes et sources secrètes ont été recensées en Estonie (Heinsalu et Vallner, 1995). Comme toutes les rivières secrètes ne commencent pas par un ponor et ne se terminent pas aux sources, le nombre actuel de rivières secrètes proposé pourrait être au nombre de cent si nous considérons toutes les zones karstiques de l'Estonie. La région karstique de Kohila comprend de nombreux exemples notables, entre autres, Tuhala, Kuivajõe, Kuimetsa (figure 10), Kadaka, Aandu, Hageri et Kurevere. La capacité de débit de la rivière secrète du système karstique de Tuhala (voir figures 2, 3a) par exemple a été estimée à plus de 3 m³/s [selon Koit (2016), Koit et al. (2017) et les derniers résultats non publiés]. De plus, malgré un gradient hydraulique modeste de moins de 4 mètres pour une distance d'environ 1,3 km, les eaux souterraines peuvent voyager à une vitesse allant jusqu'à 800 m/h (Koit et al., 2017). La zone karstique de Kostivere (figures 1, 11) ne

Figure 9 : Une section presque verticale contrôlée par le joint dans la « Grande grotte » de Kuimetsa qui mène à un siphon.

Figure 10 : Une des soi-disant rivières secrètes dans le système de grottes de Kuimetsa (Photo : Blaž Kogovšek).

Figure 11 : La zone karstique de Kostivere pendant la crue printanière.

Figure 12 : Une importante variété de micro et mésoforme de type karren peut être observée sur les plages de l'île de Vilsandi.

Figure 13 : Forêt de
type alvar dans la
zone karstique de Pa-
lamulla (Photo : Blaž
Kogovšek).

fait pas partie des régions karstiques majeures, mais comporte une rivière secrète avec une capacité de débit de presque 6 m³/s (Heinsalu, 1958). D'autres exemples notables sont ceux de la rivière secrète de la zone karstique de Uhaku dans le nord-est de l'Estonie (débit jusqu'à 3 m³/s selon Heinsalu, 1977b) et de la zone karstique de Salajõe dans l'ouest de l'Estonie.

L'île de Saaremaa dans la région karstique de l'archipel de l'Estonie de l'Ouest (figure 1) présente 38 zones/occurrences de karst recensées (Kink, 1997b). Basées sur les pentes dans l'ouest du plateau de Saaremaa, les crêtes des formations côtières attirent les nombreuses zones humides et lacs, ce qui, en plus de la recharge autogène, assure la recharge allogène pour les systèmes karstiques. Pour atteindre le niveau de base local, qui dans la plupart des cas est celui de la mer, le courant contourne les formations côtières des crêtes au travers des systèmes de drainage karstiques comme les rivières secrètes. Entre autres, les zones karstiques de Küdema, Lepakõrve et Kalja présentent d'importantes rivières secrètes. Une particularité de la région karstique de l'archipel de l'Estonie de

l'Ouest est que, souvent à cause de l'importante épaisseur des surcharges de sable marin et de la position près du pied des formations côtières, les ponors ont développé de manière inattendue des pentes escarpées et une grande profondeur.

La région karstique au sud-est de l'Estonie (figure 1), moins connue et étudiée, associée avec l'affleurement carbonaté dans le Dévonien supérieur, présente des lacs karstiques mais aussi quelques systèmes karstiques qui comportent des rivières secrètes. Près des villages de Keerba, Palo et Kastamara, de nombreux courants plongent dans le karst pour refaire surface dans au moins trois des plus grands groupes de sources au nord du village de Meremäe.

Karst nu et alvar

Les paysages les plus érodés par la glaciation des régions karstiques de Kohilan dans l'archipel de l'Estonie de l'Ouest, de Pandivere et Põhja-Pärnumaa présentent souvent une couverture des sols réduite ou absente. Par conséquent, il existe de nombreuses zones de karst nues remarquables dans ces régions. Nues ou couvertes de manière éparse,

Figure 14 : Probablement la « source » karstique la plus connue d'Estonie au monde appelée « Puits aux sorcières ». Elle ressemble à un puits creusé dans une doline de suffosion dans un groupe de sources de débordement de la zone karstique de Tuhala (voir Figures 1, 2, 3a, 4). La source commence à déborder lors de conditions de débit élevés.

les zones karstiques présentent généralement un grand nombre de lapiés. Les microformes et mésoformes (lapiés) les plus importants sont présents sur Vil-sandi, l'une des îles les plus à l'ouest de l'Estonie, et sur les îlots voisins de Vaika (figure 12). Des paysages remarquables de pavements calcaires composés de dalles et de crevasses calcaires peuvent être vus dans, entre autres, les zones karstiques de Kostivere, Kuimetsa, Lipstu et Palamulla (figure 13). Ces zones karstiques nues pourraient également être appelées karst alvar en raison des prairies et des forêts de type alvar notables (figure 13) présentant une variété d'espèces rares et en voie d'extinction (Paal et al. 2009 ; Kink et Petersoo, 2010). À cause de l'abondance de forêts remarquables de type alvar dans les alentours de Märjamaa dans la région karstique de Kohila (secteur S-SO de la région karstique), Kink et Petersoo (2010) l'ont nommé « le pays des forêts de type alvar ».

Les sources karstiques et les eaux souterraines potables

Le chemin des eaux karstiques se termine dans les sources. Vilbaste (1936) et Tšeban (1975) ont respectivement recensé environ 3700 et 1312 sources en Estonie. Selon Heinsalu (1977b), la majorité de celles recensées et estimées sont des sources karstiques. Si l'on tient compte du fait que, dans de nombreux cas, les sources karstiques apparaissent en groupes en raison de leur relation aux ensembles de joints tectoniques, Heinsalu (1977b) a présumé qu'en réalité il pourrait y avoir entre 500 et 15 000 sources, selon les conditions hydrologiques. Au début, il s'agissait de sources d'eaux essentielles, près desquelles les colonies s'installaient.

Dans l'Estonie actuelle, les sources karstiques ne sont pas généralement utilisées directement comme une alimentation en eau à cause de leur qualité instable et incertaine. Cette dernière est particulièrement problématique dans le cas où la source est nourrie par recharge allogène. Dans de nombreux cas, les

eaux des sources karstiques présentent une forte concentration en substances humiques (originaires des tourbières) qui en basses concentrations n'est pas dangereuse, mais réduit l'esthétique de l'eau. Une autre raison pour laquelle les sources karstiques sont rarement utilisées pour l'alimentation en eau de nos jours, est que les eaux souterraines carbonatées reposent souvent à faible profondeur. Par conséquent, il est plus approprié d'extraire les eaux souterraines par des puits creusés ou forés, ce qui en principe devrait fournir une meilleure protection aux polluants superficiels potentiels. En réalité, selon l'épaisseur de la couverture quaternaire, les aquifères carbonatés peu profonds d'Estonie sont généralement vulnérables à toute sorte d'effets anthropiques à cause du karst. Ce qui peut être causé soit par l'activité agricole intensive, une mauvaise gestion des eaux usées, la pollution résiduelle de l'ère soviétique, le contrôle des nappes phréatiques ou par le déversement des mines (Vallner, 1994).

Conclusion

Bien que plutôt jeune sur l'échelle des temps géologiques et relativement petit en taille comparé aux autres zones

karstiques du monde, l'intensité et le polymorphisme du karst estonien font toujours impression. Nous pouvons ici observer le karst au début de son développement. Parallèlement, nous pouvons également conclure que le développement du karst dans une zone auparavant glaciaire n'est pas si linéaire et direct que nous aimerions l'imaginer. La question de la survie et de la réactivation des vestiges de formes karstiques n'est pas encore résolue. Peu importe la taille, la karstification est répandue presque partout sur l'affleurement carbonaté où les conditions préalables importantes sont remplies. De plus, les aquifères carbonatés peu profonds accueillant le karst fournissent de l'eau à près d'un tiers de la population en Estonie. Ces aquifères karstifiés peu profonds assurent de l'eau souterraine d'excellente qualité pour une utilisation quotidienne, mais sont aussi susceptibles d'entraîner une contamination anthropique ou naturelle. Cela signifie que le karst affecte quotidiennement la population sur près de la moitié du territoire terrestre de l'Estonie.

Bibliographie

- Aruja M., Eipre T., Kink H., Maastik A., Tseban E., 1976.** Pandivere piirkonna kaitseks 2 [For the protection of the Pandivere region 2]. *Eesti Loodus*, 10, 19.
- Bakalowicz M., 2005.** Karst groundwater: A challenge for new resources. *Hydrogeol J*, 13, pp. 148–160.
- Bauert H., Kattai V., 1997.** Kukersite oil shale. In A. Raukas, A. Teedumäe (Eds.), *Geology and mineral resources of Estonia* (pp. 321). Tallinn: Estonian Academy Publishers.
- Bauert H., 1989.** Discontinuity surfaces of possible microkarst origin in the Viivikonna Formation (Kukruse Stage, Middle Ordovician) of Estonia. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, Geology*, 38, 2, 77–82.
- Eipre T., 1967.** Pandivere karstijõed ja –allikad [The karst rivers and springs of Pandivere]. *Eesti Loodus*, 9, 548–553.
- Eipre T., 1987.** Pandivere kõrgustiku veevarud ja nende kasutamise võimalusi [The water resources of the Pandivere Upland and the possibilities of using them]. *EGS Aastaraamat*, 20, 43–54.
- Ekman M., 1996.** A consistent map of the postglacial uplift of Fennoscandia. *Terra Nov*, 8, 158–165.
- Gavrilova O., Randla, T., Vallner, L., Strandberg, M., Vilu, R., 2005.** *Life Cycle Analysis of the Estonian Oil Shale Industry, Estonian Fund for Nature*. Tallinn: Tallinn University of Technology.
- Heinsalu Ü., 1958.** Kostivere karstiala [Kostivere karst area]. *Loodusuurijate Seltsi Aastaraamat*, 51, 315–328.
- Heinsalu Ü., 1963a.** *Karst Pandivere kõrgustikul* [Karst in the Pandivere Upland]. Geoloogia Instituut, Tallinn.
- Heinsalu Ü., 1963b.** Ida karstiala Kuimetsas [The Ida karst area in Kuimetsa]. *Eesti Loodus*, 3, 159–164.
- Heinsalu Ü., 1967.** Karst Eestis [Karst in Estonia]. *Eesti Loodus*, 9, 542–547.
- Heinsalu Ü., 1977a.** *Karst ja looduskeskkond Eesti NSV-s* [Karst and natural environment in the Estonian SSR]. Tallinn: Valgus.
- Heinsalu Ü., 1977b.** Eesti allikad ja nende kaitse [The springs of Estonia and their protection]. *Eesti Loodus*, 7 & 8, 418–426; 490–496.
- Heinsalu Ü., 1978a.** *Karst ja karstiveed maa-aluste jõgede ja allikate aladel Põhja-Eestis ja nende kaitse* [The karst and karst waters in the areas of underground rivers and springs in northern Estonia and their protection]. Tallinn: ENSV Teaduste Akadeemia Geoloogia Instituut.
- Heinsalu Ü., 1978b.** Pindmine karst Jõhvi kõrgustikul [Surface karst in the Jõhvi Upland]. In L. Merikalju, (Ed.), *Eesti Geograafia Seltsi aastaraamat* (. pp. 27–40). Tallinn: Valgus.
- Heinsalu Ü., 1980.** Arvamus karstiõõnsustest Kolu-Tammiku maanteetrassil Kata karstiala piires [Expert opinion on the karst cavities on the Kolu-Tammiku highway in the Kata karst area]. Tallinn: ENSV TA Geoloogia Instituut.
- Heinsalu Ü., 1984.** Salajõgi. *Eesti Loodus*, 12, 792 – 795.
- Heinsalu Ü., 1987.** *Eesti NSV koopad* [The caves of Estonian SSR]. Tallinn, Valgus.
- Heinsalu Ü., Vallner, L., 1995.** Põhjavesi ja allikad [Groundwater and springs]. In A. Raukas (Ed.), *Eesti Loodus* (pp. 302–318). Tallinn: Valgus & Eesti Entsüklopeediakirjastus.
- Isachenkov B.A., 1982.** Происхождение рельефа поверхности дочетвертичных пород Северо-Запада Русской равнины [The origin of the surface topography of the quaternary rocks of the Northwest of the Russian Plain]. In Исаченков В.А., Митасов В.И. (Eds.), *Доледниковый рельеф Северо-Запада Русской равнины* (pp. 3–18). Ленинград: Геогр. общ. АН СССР.
- Joonuks H., 1974.** Ajutiste järvede maal [In the land of the temporary lakes]. *Eesti Loodus*, 25 (2), 116–119.
- Jürgenson I., 1958.** Tööstuslikud reoveed ja nende toime looduslikele veekogudele [Industrial waste water and its effects on natural water bodies]. *Eesti Loodus*, 5, 294–297.
- Karst ja allikad Pandiveres** [Karst and springs in Pandivere], 2002. Tallinn: AS Maves.
- Kelp K., 2014.** Röstla karjääri paleokarsti ilmingud [Possible paleokarst in Röstla quarry (Central Estonia)] (master's thesis). Tartu: Tartu Ülikooli geoloogia õppetool.

- Kink H., 1997a.** Karst and springs. In A. Raukas, A. Teedumäe (Eds.), *Geology and mineral resources of Estonia* (pp. 389–390). Tallinn: Estonian Academy Publishers.
- Kink H., 1997b.** Saaremaa karst ja allikad [The karst and springs of Saaremaa]. *Eesti Loodus*, 8/9, 364–366.
- Kink H., 2006.** *Veeobjektid „Eesti ürglooduse raamatus“* [Water objects in the Book of Primeval Nature of Estonia]. Tallinn: Teaduste Akadeemia Kirjastus.
- Kink H., 2007.** *Keskkonna-uuringud Nabala lubjakivimaardla piirkonnas* [Environmental study in the Nabala limestone area]. Tallinn: MTÜ Pakri Looduskeskus.
- Kink H., Andresmaa E., Orru M., 1998.** *Eesti soode hüdrogeoloogia* [The hydrogeocology of Estonian mires]. Tallinn: Teaduste Akadeemia Kirjastus.
- Kink H., Petersoo T., 2010.** *Loodusmälestised 19. Raplamaa. Loometsade riik* [Nature monuments 19. Rapla County. The state of alvar forests]. A. Miidel (Ed). Tallinn: Teaduste Akadeemia Kirjastus.
- Koito O., 2014.** *Kadaka küla karstiala ja Lohu allikate hüdrogeoloogiline uuring* [The hydrogeological study of Kadaka karst area and Lohu springs] (bachelor thesis). Tallinn: Tallinna Ülikooli geoloogia õppetool.
- Koito O., 2015.** Hagudi soo karstivööndist Kadaka küla karstiala näitel [The karstified zone of the Hagudi mire by the example of the Kadaka karst area]. In M. Küttim, L. Umbleja, P. Vacht, L. Krusta, L. Truus (Eds.). *Sügisball. Noorgeograafide sügisümpoosioni artiklite kogumik* (pp. 24–36). Tallinn: Tallinna Ülikooli Kirjastus.
- Koito O., 2016a.** *Hydrogeological and hydrogeological study of Tuhala karst area* (master's thesis). Tallinn: School of Natural Sciences and Health, Tallinn University.
- Koito O., 2016b.** Kuidas on seotud pinna- ja põhjavesi Tuhala karstiala? [How are the surface and groundwater related in the Tuhala karst area?] *Eesti Loodus*, 67 (9), 32–37.
- Koito O., Barberá J. A., Kivi I.-K., Martma T., 2018.** Assessing hydrochemical interactions between a humic-rich stream and a shallow karst aquifer using natural tracers (Tuhala karst system, N Estonia). Paper presented at Eurokarst 2018: The european conference on karst hydrogeology and carbonate reservoirs, Besancon.
- Koito O., Vainu M., 2017.** Savalduma karstiala, Tamsalu linna heitveelask [Savalduma karst area, the outfall for the waste water of Tamsalu]. *Eesti Loodus*, 68 (12), 22–27.
- Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., F. Rubel, 2006.** World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15, 259–263.
- Leisk Ü., Rebane R., 2018.** *Taimkaitsevahendite jääkide sisalduse ja dünaamika uuring pinna- ja põhjaveses* [Survey on the content and dynamics of pesticide residues in surface and groundwater]. Tallinn: Eesti Keskkonnauuringute Keskus OÜ.
- Leisk Ü., 2017.** *Nitraaditundliku ala põhjavee seire 2016. a* [Groundwater monitoring in the Nitrate-sensitive area 2016]. Tallinn: Eesti Keskkonnauuringute Keskus OÜ.
- Maastik A., 1973.** Karstikoobas Kata külas [A karst cave in the Kata Village]. *Eesti Loodus*, 8, 493–494.
- Makkaveyev A.H., 1976.** О роли плейстоценовых оледенений в создании низменностей Северо-Запада Русской равнины [On the role of the Pleistocene glaciations in the creation of lowlands of the North-West of the Russian Plain]. In V Всес. совещ. по изучению краевых образований материковых оледенений (pp. 85–86). Киев: Тезисы докладов.
- Maves AS., 2006.** *Pandivere ja Adavere-Põltsamaa nitraaditundlik ala* [The Pandivere and Adavere-Põltsamaa Nitrate-sensitive area]. Tallinn: Keskkonnaministeerium.
- Miidel A., Vaher R., 1997.** Neotectonics and recent crustal movements. In A. Raukas & A. Teedumäe (Eds.), *Geology and mineral resources of Estonia* (pp. 177–180). Tallinn: Estonian Academy Publishers.
- Olesk K., 2016.** *2015. Aasta põhjaveevaru bilanss* [2015. Annual groundwater storage budget]. Tallinn: Data Management Department, Estonian Environment Agency.
- Paal J., Rajandu E., Rooma I., 2009.** Alvar forest of Harjumaa district. *Stud / Metsanduslikud Uurim*, 50.
- Pahkla Ö., 1969.** Merelahtede reostamine Eestis [Pollution of the bays in Estonia]. *Eesti Loodus*, 12 (1), 17–18.
- Palumets L., Proosa H., 2003.** Virulase karstikoobas Tuhalas [The Virulase karst cave in Tuhala]. In E. Pirrus (Ed.), *Eluta loodusmälestiste uurimine ja kaitse* (pp. 64–74). Tartu-Tallinn: Eesti TA Looduskaitse

komisjon.

- Perens R., Vallner L., 1997.** Water-bearing formation. In A. Raukas & A. Teedumäe (Eds.), *Geology and mineral resources of Estonia*. Tallinn: Estonian Academy Publishers.
- Perens R., Punning J.-M., Reinsalu E., 2006.** Water problems connected with oil shale mining in North-East Estonia. *Oil Shale*, 23.
- Pirrus E., 2005.** Aluspõhjaastangute karst – Põhja-Eesti paelava iseloomulik geotoop [Escarpment karst – a characteristic geotope of the North-Estonian limestone plateau]. In A. Raukas (Ed.), *Eesti Geograafia Seltsi aastaraamat* (pp. 66-75). Tallinn: Eesti Entsüklopeediakirjastus.
- Pirrus E., 2007.** *Karst Eestis* [Karst in Estonia]. Tallinn: MTÜ GEOguide Baltoscandia.
- Puura V., Vahter R., Tuuling I., 1999.** Pre-Devonian landscape of the Baltic Oil-Shale Basin, NW of the Russian Platform. *Geol Soc London, Spec Publ*, 162, 75–83.
- Puura V. A., 1980.** К проблемам кайнозойской тектоники и формирования речной сети в Балтоскандии [The problems of Cenozoic tectonics and the formation of the river network in Baltoscandia]. In A. Раукас (Ed.), *Палеотектоника Прибалтики и Белоруссии (Тезисы VIII совещания по тектонике Белоруссии и Прибалтики)* (pp. 77–81). Таллин.
- Puura V., Mardla A., 1972.** The structural dissection of the sedimentary cover of Estonia. *Proceedings of the Academy of Sciences of the Estonian SSR Chemistry Geology*, 21, 1, 71–77.
- Puura V., Vahter R., 1997.** Cover structure. In A. Raukas & A. Teedumäe (Eds.), *Geology and mineral resources of Estonia* (pp. 167-177). Tallinn: Estonian Academy Publishers.
- Saarse L., Vassiljev J., Miidel A., 2003.** Simulation of the Baltic Sea Shorelines in Estonia and Neighbouring Areas. *Journal of Coastal Research*, 19(2), 261-268.
- Saarse L., Vassiljev J., Miidel A., Niinemets E., 2007.** Buried organic sediments in Estonia related to the Ancylos Lake and Litorina Sea. In P. Johansson, P. Sarala (Eds.), *Applied Quaternary research in the central part of glacial terrain, Geological Survey of Finland* (pp. 87-92), Special Paper 46.
- Saarse L., Vassiljev J., Rosentau A., 2009.** Ancylos Lake and Litorina Sea transition on the island of Saaremaa, Estonia: a pilot study. *Baltica*, 22, 51-62.
- Sepp M., 2017.** Ida-Virumaa kaevandusala tehisallikad [The artificial springs of the Ida-Virumaa mining region]. *Eesti Loodus*, 1, 18-23.
- Sõstra Ü., Kallaste T., 2008.** Sonda tektoonilise rikke hüdrotermilised mineraalid [Hydrothermal minerals in the Sonda tectonic fault]. *Estonian Combustible Natural Resources and Wastes*, 1-2, 6-8.
- Suuroja K., Morgen E., Mardim T., Kaljuläte K., Shtokalenko M., 2012.** *Eesti Geoloogilise baaskaardi Kohila (6332) seletuskiri* [Explanatory note of the Geological Base Map of Estonia Kohila (6332)]. Tallinn: OÜ Eesti Geoloogiakeskus.
- Suuroja K., Ploom K., Mardim T., All T., Kaljuläte K., Kõiv M., Vahtra T., 2003.** *Eesti Geoloogilise baaskaardi Vaida (6341) seletuskiri* [Explanatory note of the Geological Base Map of Estonia Vaida (6341)]. Tallinn: OÜ Eesti Geoloogiakeskus.
- Tavast E., 1997.** Bedrock topography. In A. Raukas & A. Teedumäe (Eds.), *Geology and mineral resources of Estonia* (pp. 252-255). Tallinn: Estonian Academy Publishers.
- Toomik A., Liblik V., 1998.** Oil shale mining and processing impact on landscapes in north-east Estonia. *Landsc Urban Plan*, 41, 285–292.
- Tšeban E., 1975.** *Eesti NSV põhjavesi ja selle kasutamine* [The groundwater of Estonian SSR and its use]. Tallinn.
- Tuuling I., 2009.** Läänemeri ja selle nõo lahendamata saladused [Baltic Sea and the unsolved mysteries of its depression]. *Eesti Loodus*, 7, 349-355.
- Vallner L., 1994.** Problems of groundwater quality management in Estonia. In K. Kovar, & J. Soveri (Eds.). *Groundwater Quality Management* (pp. 449–460). Wallingford: IAHS.
- Vallner L., Sepp K., 1993.** Effects of pollution from oil shale mining in Estonia. *L Degrad Dev*, 4, 381–385.
- Vallner L., Sildvee H., Torim A., 1988.** Recent crustal movements in Estonia. *J. Geodynamics*, 9, 215–223.