

Karsti hüdroteoloogiast

MSc Oliver Koit
doktorant ja nooremteadur
Ökoloogia keskus
Tallinna Ülikool

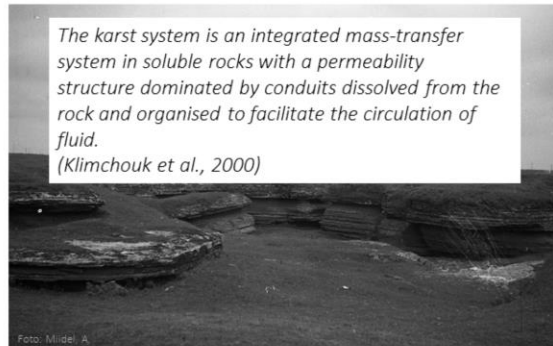


TALLINNA ÜLIKOOL

1

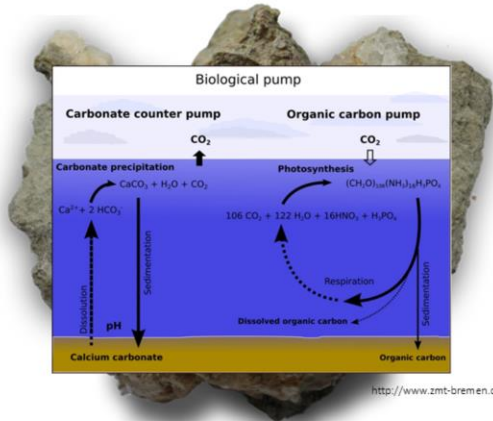
Kar(r)a – kars – kras – karst

- **Karst** – protsesside ja nähtuste kompleks, mis tuleneb kivimite keemilisest ja mehaanilisest kulutusest voolava pinna- ja põhjavee toimel.
- **Karstumise** tulemusena kujuneb maastikele iseäralik hüdro(geo)loogiline režiim ja pinnamood
- Sõna **kras** tuleneb Sloveenia keelest, tähendades kivi, kivist ja viljatut maad, eelkõige Kras-i platood Sloveenia ja Itaalia piiril.



Karstuvad kivimid

- Üldjuhul karbonaatkivimid
 - Lubja- ja dolokivi
 - Kriit ning marmor
- Evaporiidid
- Karbonaatkivimi koostisest moodustavad üle 50% karbonaatsed mineraalid.
- Lubjakivi koosneb peamiselt kaltsiidist ja/või aragoniidist (CaCO_3)
- Dolokivi koosneb peamiselt dolomiidist [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$]
- Karbonaatkivimid on bio- või kemogeensed



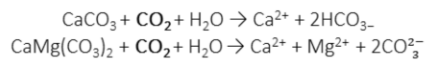




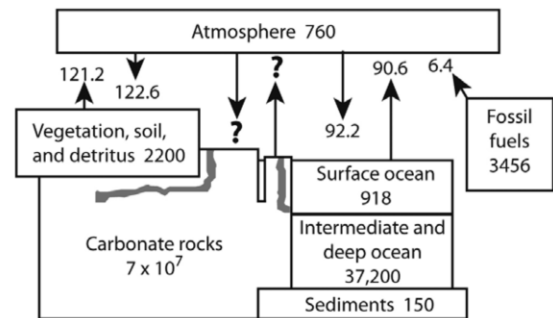
Tabulaat

Karbonaatkivimite karstumine

- Karstumine on lahustumisprotsess, mille käitajaks on (peamiselt) CO₂ sisaldavad happelised veed
- CO₂ korjatakse üles vähem atmosfäärist ja enam mullast ning moodustub süsihape.
 $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}_2\text{CO}_3$



- Karstumisprotsessi kulgemine sõltub keskkonna karbonaatsest tasakaalust
- Süsinikuringe



Source: Martin et al., 2013

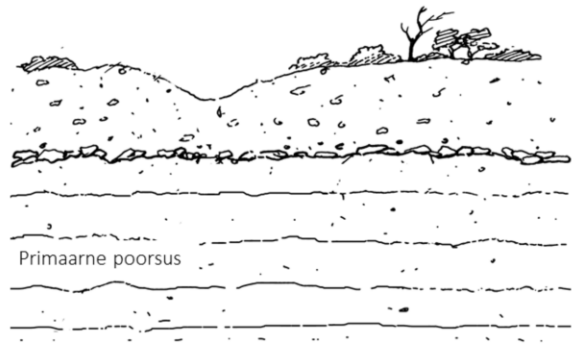
dissolution products

Joonis. Karstumine lihtsustatult (Peterson, E. W.)

KOLM RÜNDAJAT - Peale CO₂ dissotseerivad CaCO₃ veel ka vesi ja teised happed

Karsti arengu eeldused

1. Karstuvad kivimid

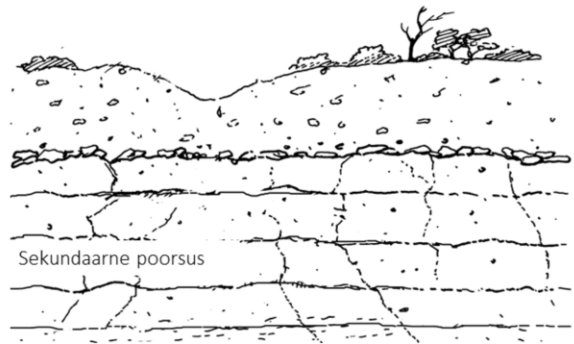


Source: Project Underground

Vaja on kivimeid

Karsti arengu eeldused

1. Karstuvad kivimid
2. Hästiarenenud lõhelistus kivimis

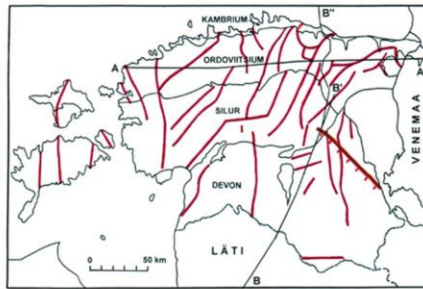


Source: Project Underground

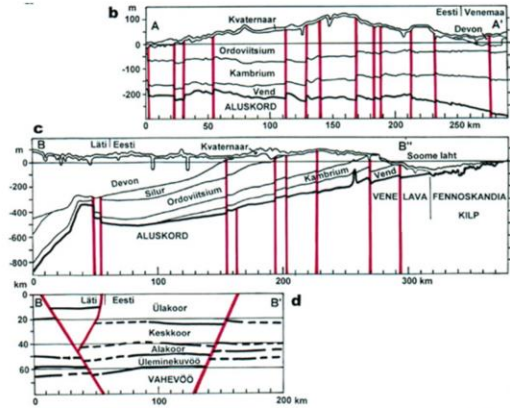


Vaja on lõhesid – sekundaarne poorsus

Aluspõhjajakivimite tektoonika



Puura & Vaher, 1999



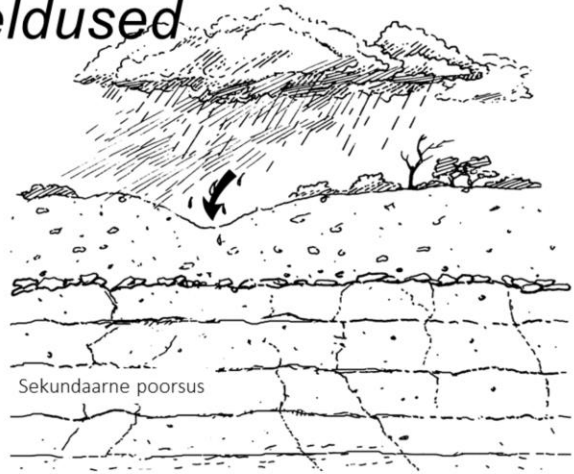
A lot of tectonics in Estonia are related to caledonian orogeny (late-cambrian-to early devonian)





Karsti arengu eeldused

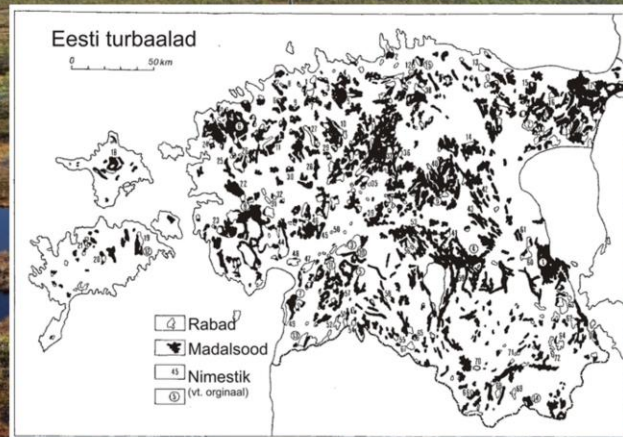
1. Karstuvad kivimid
2. Hästiarenenud lõhelistus kivimis
3. Piisavas koguses vett...



Source: Project Underground

Vaja on vett

Niiske kliima = palju märgalasid



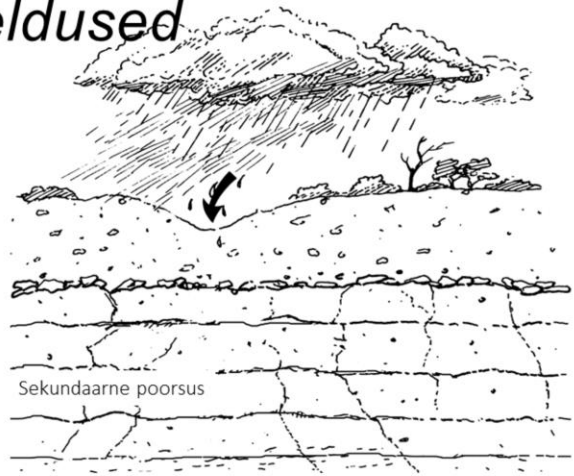
Vett nagu oleks

As the average annual amount of precipitation according to the Kuusiku and Tallinn-Harku weather stations (for locations see Fig. 1) of the Estonian Weather Service (735 mm) exceeds the average annual evapotranspiration (430-450 mm) (Kink 2007), humid conditions prevail.

ABOUT 22% of Estonia's land territory is peatlands = areas where peat accumulates, this means wet conditions prevail

Karsti arengu eeldused

1. Karstuvad kivimid
2. Hästiarenenud lõheline kivim
3. Piisavas koguses vett... ja gradient



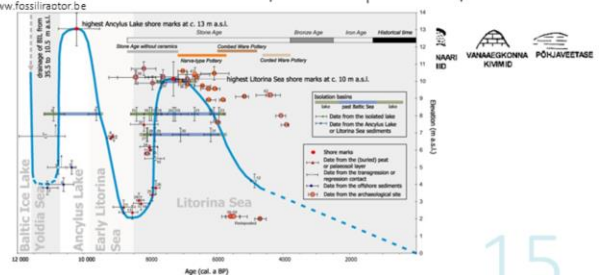
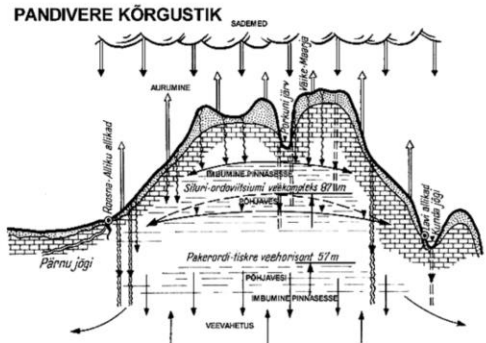
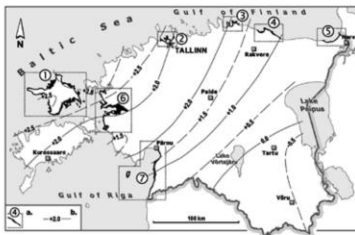
Source: Project Underground

Vesi peab ka voolama, seega on vaja gradienti

Gradient



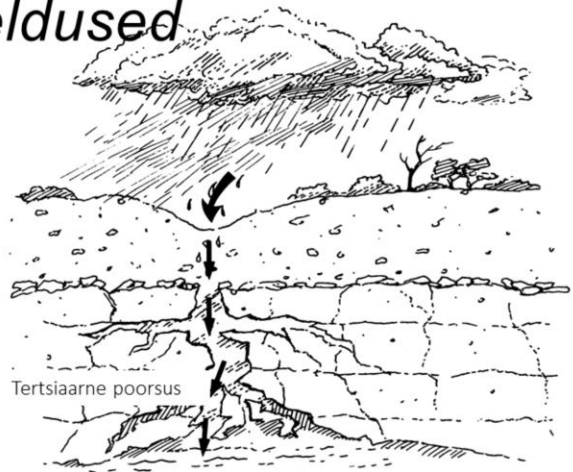
Source: <http://www.fossiliraator.be>



Suhteliselt lamedas Eestis tekitavad gradienti: aluspõhja reljeef (astangud (mida on võimendanud näiteks erinevad läänemere staadiumid), kõrgustikud, kõvikud, ürgorud, jääkulutusnõod); maakerge

Karsti arengu eeldused

1. Karstuvad kivimid
 2. Hästiarenenud lõhelus kivimis
 3. Piisavas koguses vett ja gradient
- = KARSTUMINE



Source: Project Underground

Kui kõik eeldused on täidetud, toimub karstumine – areneb tertsiaarne poorsus

Karsti pinnavormid - Exokarst

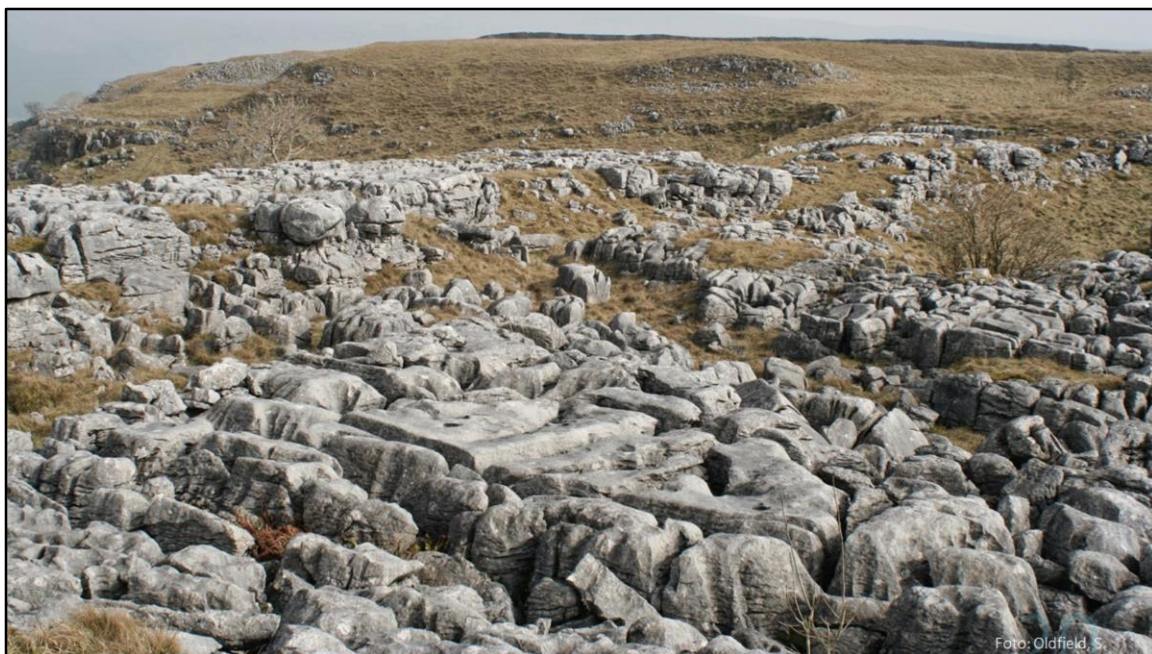
**Cryptokarst – karst, mis areneb pinnakatte all*



karrid



karrid



Karrid - avalõhed



karrid - avalõhed



Ristuvate avalõhede vahele kujunenud kastjas langatus



Sufosioonilehter – langatuslehter pinnakattes





Langatuslehtrite liitumisel kujuneb karstiorg - Uhaku



Langatuslehtrite liitumisel kujuneb karstiorg - Uhaku

Maaaluse karstivormid - Endokarst

**Hyperkarst – karst, mis areneb meteoorsete vete kulutusel*

**Hypokarst – juveniilsete vete toimel arenev karst*

27

Hüpogeenne karst - “formed by water in which the aggressiveness has been produced at depth beneath the surface, independent of surface or soil CO₂ or other near-surface acid sources.”



Voolukanalid





Koopad







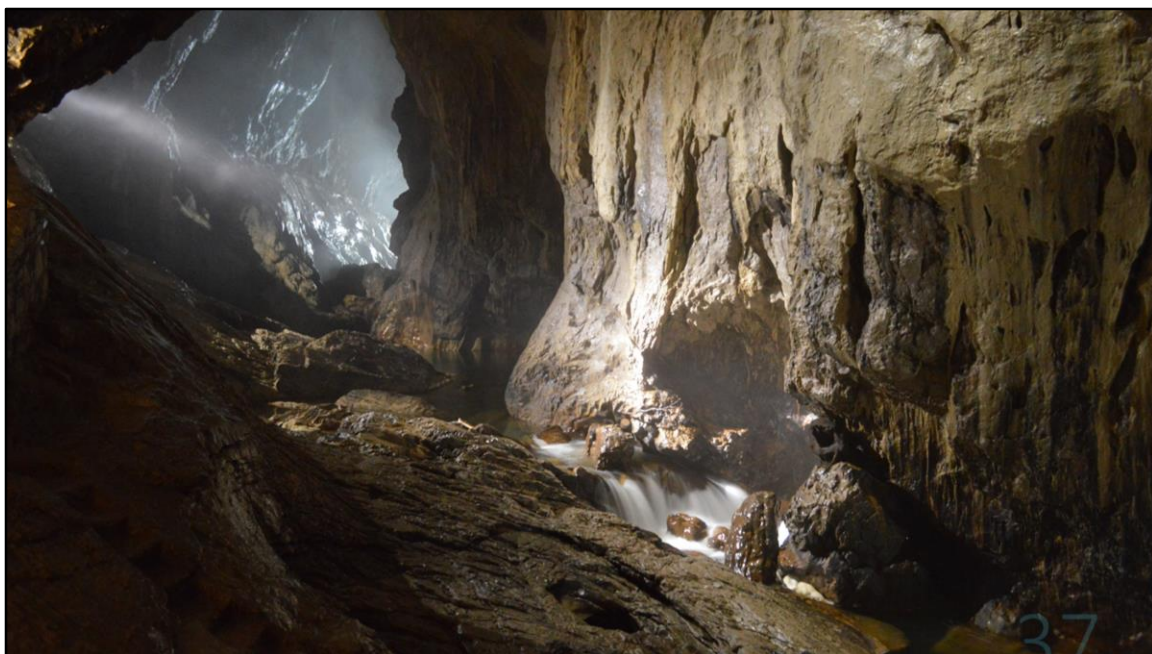




Pivka jõgi Postojna koobastikus



Skocjani koobas Krasi platool



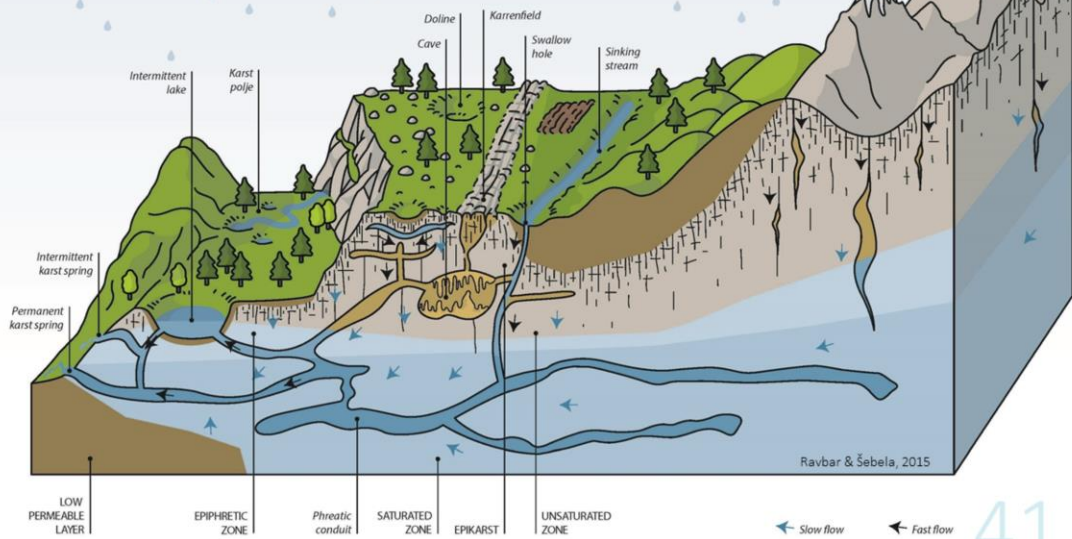
Skocjani koobas Krasi platool







Karstunud põhjaveekiht



Karstunud põhjaveekiht

- On anisotroopne ja heterogeenne
- Vesi voolab dominantselt sekundaar- ja tertsiaarpoorsetes tühemetes (kihipinnad, lõhed, voolukanalid ja koopad).
- Ford ja Williams (2007) järgi osaleb veekihi veevaru kogumahust keskmiselt vaid kuni 5% nn „kiires“ voolus.
- Ülejäänud 95% karsti veekihi veevarust asub kivimi maatriksis ja ei osale aktiivselt voolus.
- Suur tertsiaarpoorne voolukiirus + piiratud isepuhastusvõime = reostuse kiire levik

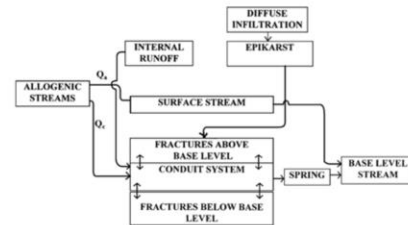


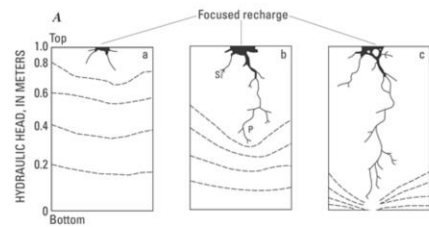
Fig. 2. Conceptual model for the carbonate aquifer.

Generally, just as in porous aquifers, solute transport in karst aquifers is controlled by the processes of advection, dispersion and adsorption. However, the high heterogeneity of karst systems and the interaction between the conduit and the matrix system make solute transport in karst aquifers a complex process.

Within fractures, transport occurs primarily by advection while dispersion is a minor factor

Karstunud põhjaveekihi kujunemine

- Karstunud pvkihi „tööhobusteks“ on voolukanalid.
- Voolukanalid kujunevad lõhedest, mille diameeter ületab **lõhefaasi** läbides kriitilise piiri (~ 1 cm), võimaldades seejärel turbulentset põhjavee voolu. See faas võib kesta 1 ka – 10 Ma (Bosak, 2008).
- Järgneva **lõbimurdefaasi** käigus toimub suhteliselt järsk üleminek kiirele lahustumisele. See faas võib kesta kuni 100 ka, üldjuhul vähem kui 10 ka (Bosak, 2008).
- **Suurenemisfaasis** saab protovoolukanalist/koopast päriskoobas (diameeter > 1 m). See võib toimuda mõnesaja kuni üle 100 ka vältel (Bosak, 2008).



Vahelepõige - Eesti karsti vanus

- Arvatakse, et Eesti on aktiivne karst üldjuhul „noor“
- Samas võib vanem karst olla väga vana
 - Siluris
 - Devon-Kvaternaar
 - Kvaternaar

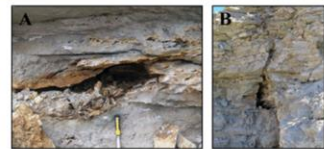
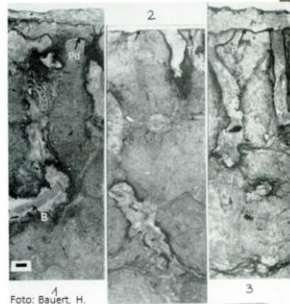


Foto: Kelo, K.

- Tänapäevased aktiivsed vormid on üldjuhul arenenud peale viimast jäätumist ja on seotud sarnaste mõjuritega nagu jõgedevõrk. Osaliselt võivad tänapäevased vormid põhineda varasematel karstivormidel (dreenivõrgustikust üldjuhul). Leidub ka viimase jäätumise eelseid vorme.
- On leitud ka väga vana karsti – Kukuruse kihistu karstunud katkestuspind ja trypanitese ussikäigud
 - Silur – 10 miljoni aastane maismaaline periood
 - Teine periood, kestusega 340 miljonit aastat, hõlmas ajavahemikku Ülem-Devonist kuni esimese jääajani Kvaternaaris. Selle väga pika kulutusperioodi vältel kujunes välja ka tänapäeval nähtav aluspõhja reljeef. Enne jääaegu oli karstumine kõige intensiivsem arvatavasti Paleogeenis ja Neogeenis umbes 50 miljoni aasta vältel, kui vaadeldav ala kerkis tektooniliste tõusuliikumiste tulemusena ja meri oli Eesti suhtes üle 100 meetri madalam praegusaegsest tasemest. Siis kulutati aluspõhja sügavad orud, mistõttu kohalik erosioonibaas oli paljudes kohtades mitmekümne meetri sügavusel. See soodustas karstivormide arengut
 - Kvaternaari jäävaheajad (aga ka jääajad?), mille jooksul Eesti oli mitmel korral kaetud mandrijääga ning mis iga kord kandis ära peaaegu kogu varasema pinnakatte. Väiksemale ja suuremale kulutusele allusid ka osad

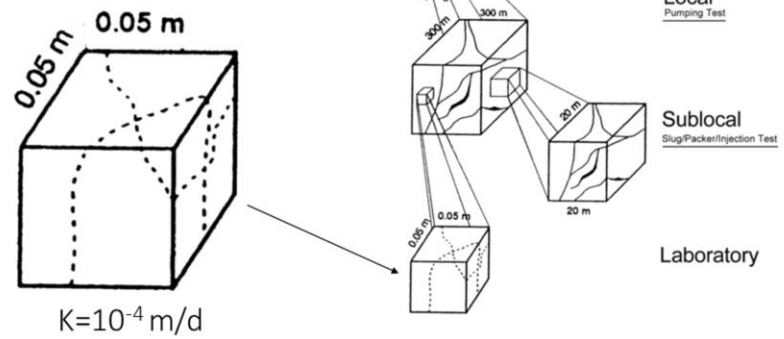
aluspõhja pealmised kihid, mille tagajärjel pindmised karstivormid suuremalt jaolt hävinesid.

Karstunud põhjaveekiht ja „duaalsused“

- Toite duaalsus
 - ✓ Autogeenne
 - ✓ Allogeenne
- Infiltratsiooni duaalsus
 - ✓ Hajus/difusiivne infiltratsioon
 - ✓ Punktinfiltratsioon
- Voolu duaalsus
 - ✓ Aeglane vool läbi primaarpoorse maatriksi ning sekundaarpoorsete pragude ja lõhede
 - ✓ Kiire vool läbi tertsiaarpoorsete voolukanalite ja/või koopasüsteemide
- Välje duaalsus
 - ✓ Hajus ehk difusiivne välje
 - ✓ Punktvälje

Karstunud põhjaveekiht j

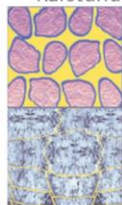
- Karstunud veekihi veejuhtivus sõltub selle interpreteerimise skaalast



46

Karstunud põhjaveekihi veejuhtivus

Karstunud veekihi veejuhtivus



Liivpinna, filtratsioonikoeffitsient $k=5$ m/d, efektiivpoorsus (kollane) on 15%

Vee liikumiskiirus lubjakivi lõhes on 10 korda suurem kui liivas. Samades tingimustes levib võimalik reaalne lubjakivides tunduvalt kaugemale ja kiiremini.

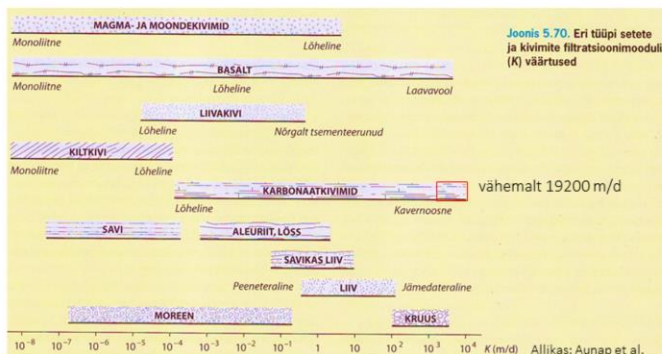
Lubjakivi, filtratsioonikoeffitsient $k=5$ m/d, efektiivpoorsus (kollane) on 1,5%

Joonis 9 Vee tegelik liikumiskiirus sõltub vett sisaldava pinnase poorsusest

Põhjavee tegeliku liikumise kiirust on vaja teada reostuse liikumise kiiruse hindamiseks. Vee pinna levinumad looduslikud kalded Eestis on 0,01–0,001 ja ligikaudne vee tegelik liikumiskiirus erinevates pinnastes on:

tolmliivas 5 m/aastas;
peenliivas 20 m/aastas;
keskliivas 70 m/aastas;
kruusliivas 250 m/aastas;
puhtas kruusas 5 m/päevas;
karstunud lubjakivis üle 100 m/päevas.

Karise et al. (2004)



Karstunud põhjaveekihi interpreteerimine

- Klassikalised karstunud veekihi veejuhtivuse ja voolusuundade vale interpretatsiooni näited

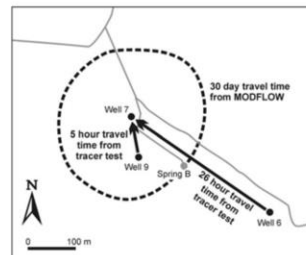
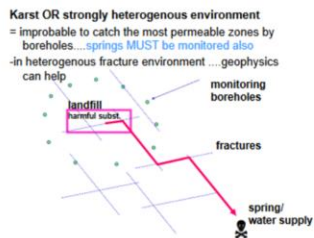
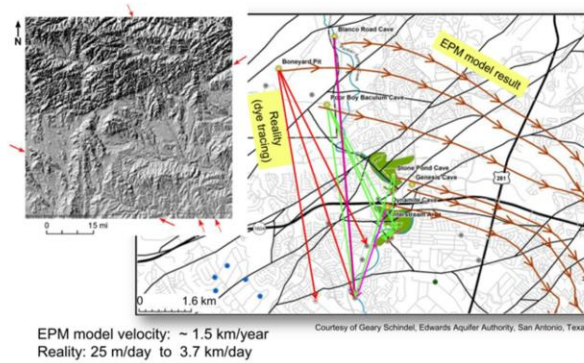


Figure 1.3. Trajectories and travel times for tracers injected in monitoring wells #6 and #9 and recovered in pumping well #7, showing velocities >300 m/day, compared to a 30 day capture zone for well #7 predicted using MODFLOW (after Worthington et al. 2003).

Walkerton is a rural town in Ontario, Canada, with a population of some 5000 people. In May 2000 some 2300 people became ill and seven died from as a result of bacterial contamination of the municipal water supply. The principal pathogens were *Escherichia coli* O157:H7 (a pathogenic strain of *E. coli*) and *Campylobacter jejuni*. Subsequent epidemiological investigations indicated that most of the contamination of the water supply had occurred within hours or days at most after heavy rain.

Karstunud põhjaveekiht interpreteerimine

- Klassikalised karstunud veekihi veejuhtivuse ja voolusuundade vale interpretatsiooni näited



Karsti uurimine

Method or group of methods	Data obtained/advantages	Disadvantages/limitations
Geological methods	Aquifer framework and geometry information Karstifiability of the rock Orientation, location, type and frequency of potential flow paths Theoretical hydraulic conductivity and porosity	Data not necessarily directly related to groundwater Often not a predictable and unambiguous relation between lithology and hydrogeology
Geomorphological methods	Degree of karstification Types of recharge Historical hydrogeomorphology	Data mainly from the surface (indirect) Static framework rather than hydrodynamics Limited data from covered karsts
Speleological methods	Locating and mapping conduits in 3D Monitoring water quality and quantity within the aquifer Determining the temporal evolution of conduit systems	Access to cave systems may be limited or non-existent Specialist speleological skills required Only a small and perhaps unrepresentative part of the aquifer is likely to be accessible
Hydrological methods	Water budget compilation Characterisation of flow systems by spring hydrograph analysis	Water budget often incomplete, as catchment boundaries are not always clear, and not all inputs and outputs can be monitored Hydrograph alone gives limited information of the origin of the water (needs to be combined with chemograph)
Hydraulic methods	Determination of transmission and storage characteristics Determination of piezometric level Determination of groundwater velocity and flow direction	Many methods not wholly appropriate under non-Darcian conditions Estimates of flow directions and magnitudes may not be accurate Pumping tests may not give representative results
Hydrochemical methods	Hydrochemical characterisation of groundwater bodies Information on water quality and contamination problems May be used as natural tracers for the origin and movement of the water	Difficulties in developing an adequate sampling strategy (high temporal variability) In karst aquifers, microbial contamination is often of greater importance than chemical

Goldscheider & Drew (2007)

50

KATUSEGA JÕED!

Karsti uurimine

Method or group of methods	Data obtained/advantages	Disadvantages/limitations
Isotopic methods	May be used as natural tracers for the origin and movement of the water; this includes: Identifying sources of karst waters and mixing processes Determining residence time/age of karst waters	Input function not known precisely Ambiguities possible in interpreting data
Tracer methods	Determination of flow routes and velocities Determining contributing areas for springs Information on contaminant transport Usually very reliable, precise and unambiguous information	Difficulty in recognising "negative" tracings Usually only gives information for selected points and the hydrological conditions during the tracer test Limited applicability for very deep and large systems with very long transit times Visible colouring and toxicity concerns for some tracers
Geophysical methods	Determining geological structures and overburden thickness Locating conduits, fractures and other preferential flow paths Data can be obtained over wide areas Information on the structure and properties of the underground without drilling, i.e. at relatively low cost	Results may be difficult to interpret without ambiguity (non-uniqueness) Resolution vs. depth of investigation (i.e. the greater the depth, the lower the resolution) Some techniques require very precise location control (gravimetry), others have noise problems or require heavy or expensive equipment
Modelling methods	Conceptualising all or a component of karst aquifer systems May give a better understanding of specific processes, such as speleogenesis, conduit flow and conduit-matrix interactions Simulating groundwater flow and contaminant transport Predicting changes in water quality and quantity	Difficulties in applying conventional models for flow and transport (modelling may lead to significantly erroneous results if the nature of karst is not adequately considered) Exact data requirements for holistic modelling (distributive models ideally require data on the location and geometry of the entire conduit network, which is never available)

Goldscheider & Drew (2007)

51

Karsti uurimise olulisus

- Veekvaliteet [VIDEO](#)
- Üleujutused
- Langatusoht
- Probleemid vee inseneerias
- Raskendab kaevandamist
- Maavarad (nafta, maagaas, boksiit, plii, tsink jne)
- Karstivormid, eriti karstikoopad on elupaigaks unikaalsetele ökosüsteemidele
- Koopad on väärtuslikud infoallikad paleouuringutel



Joonis. Corvette muuseumilangatus Kentucky's 2014. aasta ([superchevy.com](#))
Joonis. Esimene kookest lütkus ja õnneks ei saanud juhtumisi Dismundite ajast
(kõik kolm on siin) ([FCA on Drive](#))

Karsti levik

- Umbkaudu 14%-l Maa pindalast avanevad või paljanduvad karbonaatkivimid, üldjuhul on need ka karstunud.
- 20-25% globaalpopulatsioonist sõltub vähemalt osaliselt karstunud põhjaveekihtide veest.
- Eestis on karsti levik seotud S, O ja D kivimite avamusaladega.
- Eelistatud on aluspõhjalised kõrgustikud/kõvikud ja astangud.
- Eesti S-O põhjaveekompleks on oluline veevarustuse allikas Põhja-Eestis.

