

Szivárgáshidraulikai modellek geológiai szerkezete

J.P. Brandenburg
Fordította: Jakab András

Szivárgáshidraulikai modellek geológiai szerkezete

The Groundwater Project

I

J.P. Brandenburg

*Senior Geologist
Haley & Aldrich, Incorporated
Ann Arbor, Michigan, United States*

*Fordította Jakab András
Jakab és Társai Kft.*

*Szivárgáshidraulikai
modellek geológiai
szerkezete*

*The Groundwater Project
Guelph, Ontario, Canada*

Minden jog fenntartva. A kiadvány szerzői joggal védett. A könyv részei semmilyen formában és eszközzel nem másolhatók a szerzők írásos engedélye nélkül. (engedély igényléséhez a kapcsolat a következő címen vehető fel: permissions@gw-project.org). A kereskedelmi forgalmazás és másolás szigorúan tilos.

A GW-Project kiadványok ingyenesen letölthetők a gw-project.org weboldaltól. Bárki használhatja és megoszthatja a gw-project.org linkeket a könyvek letöltéséhez. Nem engedélyezett a GW-Project dokumentumok más weboldalakon való rendelkezésre bocsátása, és a letöltött anyagok másolatai sem küldhetők el közvetlenül mások számára.

Copyright © 2020 J.P. Brandenburg (a szerző)

Kiadó: the Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada, 2020.

Brandenburg, J.P.

Geologic Frameworks for Groundwater Flow Models / J.P. Brandenburg - Guelph, Ontario, Canada, 2020.

29 pages

ISBN: 978-1-7770541-9-9

DOI: <https://doi.org/10.21083/978-1-7770541-9-9>

Fordította Jakab András

29 oldal

ISBN: 978-1-77470-073-0

Az új kiadványok, események és a Groundwater Project-ben való részvétellel kapcsolatos információkért, kérjük fontolja meg a Groundwater Project levelező listára való feliratkozást. A hírlevélre való feliratkozás segíti egy globális felszínalatti vizes közösség kiépítését. [Feliratkozás](#).

Hivatkozás: Brandenburg, J.P., 2020, [Geologic Frameworks for Groundwater Flow Models](#). The Groundwater Project, Guelph, Ontario, Canada,



Szerkesztők: John Cherry és Eileen Poeter

Igazgatóság: John Cherry, Paul Hsieh, Ineke Kalwij, Stephen Moran, Everton de Oliveira, Eileen Poeter

Igazgatótanács: John Cherry, Allan Freeze, Paul Hsieh, Ineke Kalwij, Douglas Mackay, Stephen Moran, Everton de Oliveira, Beth Parker, Eileen Poeter, Ying Fan, Warren Wood, Yan Zheng.

Fedőlap: J.P. Brandenburg, 2020

Magyarra fordította: Jakab András

Tartalomjegyzék

SZIVÁRGÁSHIDRAULIKAI MODELLEK GEOLÓGIAI SZERKEZETE	I
TARTALOMJEGYZÉK	IV
THE GROUNDWATER PROJECT ELŐSZÓ	V
ELŐSZÓ.....	VI
ELŐSZÓ A MAGYAR FORDÍTÁSHOZ.....	VII
BEVEZETŐ.....	VIII
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	IX
1 ÁTTEKINTÉS	1
2 BEVEZETÉS.....	2
3 KONTEXTUS ÉS CÉLOK	4
3.1 KONCEPCIONÁLIS MODELLEK.....	4
3.2 LOKÁLIS GEOLÓGIA.....	4
3.3 STRUKTURÁLIS GEOLÓGIA.....	4
3.4 SZTRATIGRÁFIA.....	5
4 A SZERKEZETRENDSZER FELÉPÍTÉSE.....	6
4.1 TÉRKÉPEK ÉS KERESZTSZELVÉNYEK	6
4.2 FELÜLETEK.....	6
4.3 RÁCSOZÁS	9
5 TULAJDONSÁGOK SZÁMÍTÁSA.....	12
5.1 TELJES VASTAGSÁG.....	12
5.2 TÉNYLEGES (NETTÓ) VASTAGSÁG	13
5.3 A TÉNYLEGES/TELJES VASTAGSÁGARÁNY.....	14
5.4 TULAJDONSÁGOK.....	14
6 A MODELL.....	16
7 STATIKUS MODELL SZERKESZTÉSE FÁCIÉS TÉRKÉP ALAPJÁN	17
8 STATIKUS MODELL SZERKESZTÉSE FELSKÁLÁZOTT TULAJDONSÁGOK ALAPJÁN	18
9 STATIKUS MODELL SZERKESZTÉSE LITOLÓGIAI ADATOK ALAPJÁN	20
10 ÖSSZEFOGLALÓ.....	21
11 HIVATKOZÁSOK	22
12 GYAKORLATOK	23
1. GYAKORLAT	23
2. GYAKORLAT	23
3. GYAKORLAT	23
13 1. KERET SZÓRVÁNYOS ADATOK RÁCSOZÁSA	23
14 GYAKORLATOK MEGOLDÁSAI	26
1. GYAKORLAT - MEGOLDÁS.....	26
2. GYAKORLAT - MEGOLDÁS.....	26
3. GYAKORLAT - MEGOLDÁS.....	26
15 A SZERZŐ.....	27
16 A FORDÍTÓ.....	28
MODIFICATIONS TO ORIGINAL RELEASE.....	A

The Groundwater Project előszó

A UN-Water tagjai és partnerei néhány évre előre meghatározzák az éves tematikákat. A 2022. március 22-i Víz Világnapja témája: „A felszínalatti víz: tegyük a láthatatlant láthatóvá”. A tematika kiválóan illik a 2020-ban megjelent első Groundwater Project (GW-Project) könyvekhez, melyek célja a felszínalatti vizek láthatóvá tétele.

A GW-Project, egy Kanadában 2019-ben bejegyzett non-profit szervezet, amely elkötelezetten járul hozzá az oktatás fejlesztéséhez, és egy új hozzáállást képvisel a megértéshez és a problémamegoldáshoz szükséges tudás létrehozásában és terjesztésében. A GW-Project működteti a <https://gw-project.org> weboldalt, amely egy globális platform a felszínalatti vízzel kapcsolatos tudás demokratizálása terén, és az alábbi elven alapszik:

„A megismerés legyen ingyenes, és a legjobb tudás legyen ingyenes tudás.” Anonymus

A GW-Project missziója, hogy elérhető, vonzó és magas színvonalú oktatási anyagokat tegyen elérhetővé ingyenesen és több nyelven azok részére, akik szeretnék megismerni a felszínalatti vizeket, és megérteni az ökológiai rendszerekben és az emberiség fennmaradásában játszott szerepüket. A projekt egy új, önkéntességen és különböző szakterületeket átölelő professzionalizmuson alapuló, oktatókat, szakértőket és nyugdíjasokat mozgósító nevelési és oktatási kaland. A GW-Project, hat kontinens több mint 14 országból, több mint 200 szervezetet képviselő, több száz – folyamatosan gyarapodó – önkéntest számlál.

A GW-Project egy folyamatos kaland. Az elkövetkező években több száz, az internetről letölthető könyv kerül kiadásra először angol nyelven, majd más nyelveken. A GW-Project kiadványok kiegészítő anyagokat tartalmaznak videók, jegyzetek, laboratóriumi bemutatók és tanulási eszközök formájában, illetve rendelkezésre bocsátanak vagy linkeket közölnek ingyenes (public domain), a tanulási folyamatot támogató különböző felszínalatti vizes szoftveralkalmazásokhoz.

A GW-Project egy élő entitás, és időnként, a már kiadott könyvek további kiadásai is megjelennek. Kérjük a felhasználókat, hogy tegyenek átdolgozási javaslatokat.

Köszönjük, hogy ön tagja a GW-Project közösségnek. Reméljük, hogy a könyvek és a kapcsolódó anyagok használata során szerzett tapasztalatait megosztja velünk. Várjuk az új ötleteket és az önkéntesek jelentkezését!

GW-Project igazgatótanács

2020. november

Előszó

Az alkalmazott hidrogeológiában koncepcionális modellekre van szükség a vízgazdálkodási és a szennyeződésterjedési problémák megoldásában kulcsfontosságú szerepet játszó áramlási viszonyok leírására. A talajvíz viszonyok megértése a geológia megértésével kezdődik, majd a geológiai információk birtokában meghatározható a szivárgási tényező és a porozitás. Ezt követően, a geológiai információkból származtatott szivárgási tényező és porozitás eloszlások felhasználhatók a talajvíz áramlási rendszer hidrogeológiai értelmezésére. Az 1970-es éveket megelőzően, a hidrogeológiai értelmezések papír alapú módszerekkel történt, manapság viszont, a feladat elvégezhető arra alkalmas szoftverekkel. Ennek ellenére, a szoftverek hatékony alkalmazásának előfeltétele a konverziós folyamatok megértése. J.P. Brandenburg könyve, a „Szivárgáshidraulikai modellek geológiai szerkezete”, bevezető a kőolajiparban jól bevált, de a hidrogeológiában lemaradásban lévő konverziós folyamatba. A hidrogeológusok tisztában vannak azzal, hogy a háromdimenziós numerikus áramlásmo­dell egy fontos eszköz, de a geológiai adatok átvitele a hidrogeológiai modellbe további megismerés tárgyát képezi. A konverziót „statikus modellezésként” definiáljuk, és a „dinamikus modellezésnek” az előfeltétele. A dinamikus modellezés a felszínalatti víz áramlásának és a szennyeződés terjedésének a szimulációját jelenti (azaz, a vízadók nem mozdulnak el tehát statikusak, a fluidumok viszont, mozgásban vannak tehát dinamikusak).

Geológiai és áramláshidraulikai téren szerzett alapos képzettsége révén, a könyv szerzője, J.P. Brandenburg kimondottan alkalmas a feladatra; kőolajipari munkái során, bonyolult statikus–dinamikus konverziók sorát készítette el. Jelenleg, komplex háromdimenziós felszínalatti víz modellek konverziós kérdéseire fókuszál.

John Cherry, a Groundwater Project vezetője
Guelph, Ontario, Kanada, 2020. november

Előszó a magyar fordításhoz

A Groundwater Project egy egyedi kezdeményezés, melynek egyik legfontosabb célja, hogy a felszínalatti vizekkel kapcsolatos tudás széles társadalmi rétegek számára is elérhető legyen. Tapasztalataim szerint, a szakemberek kivételével, csak kevesen ismerik a felszínalatti vizek ökológiai és gazdasági jelentőségét, mert nincsenek tisztában még magának a fogalomnak a mibenlétével sem, ezért, még kevesebben vannak tisztában azzal, hogy az milyen óriási, de ugyanakkor veszélyeztetett kincsünk. A Groundwater Project önkénteseként, szeretnék részese lenni annak a bővülő közösségnek, akik a kezdeményezés céljait megvalósítják.

Nagy öröm volt számomra egy olyan könyvnek magyar nyelvre való lefordítása, amelynek tematikája elég közel áll a saját szakterületemhez. Ettől függetlenül, rengeteget tanultam a fordítás során, és meggyőződésem, hogy a könyvet olvasók is sokat tanulhatnak belőle. A 3D numerikus szivárgáshidraulikai és transzportmodellek, ha a modellezést helyesen végzik, rendkívül hasznos eszközei a vízgazdálkodásban, a környezetvédelemben, az építőiparban, és szinte minden olyan iparágban dolgozó szakembereknek, akik valamilyen formában a vízhez kapcsolódóan végzik a munkájukat. Fogadják ezt a könyvet szeretettel, és élvezzék a telített zónában megkezdett kalandozás e további szakaszát.

Bevezető

A felszínalatti víz modellezők számára ajánlott a fizikai felszínalatti geológiai környezet numerikus ábrázolását lehetővé tevő szisztematikus módszerekben való jártasság, és e módszerekhez való hozzáférés lehetősége. A hidrogeológusok egyéb csoportjai számára pedig a folyamat megértése jelent előnyt. A könyv, a szivárgáshidraulikai modellek alapjául szolgáló geológiai szerkezet kidolgozásának módszereit ismerteti. Egy olyan hipotetikus terület köré van szerkesztve, ahol a felszínalatti víz szennyezett. Kezdetként, az adatgyűjtést és a geológiai értelmezést tárgyalja, majd végighalad a valósághű numerikus modell szerkesztésének lépésein. Az olvasó rájön, hogy számos számítás elvégezhető egyszerű, csupán papírt és ceruzát igénylő módszerekkel, és ahol mód van rá, általánosan rendelkezésre álló számítástechnikai erőforrások linkjeit is közli a könyv.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni az alábbi személyeknek a könyv alapos áttekintését, és a könyvhöz való hasznos hozzájárulásukat:

- ❖ John G. Solum, Shell International Exploration and Production;
- ❖ Steve Naruk, Adjunct Professor, Department of Earth and Atmospheric Sciences, University of Houston; és
- ❖ Murray Einarson, Technical Expert, Haley & Aldrich, Inc.

Méltányolom Eileen Poeter javaslatait és közreműködését. Hálás vagyok Amanda Sillsnek a szöveg átnézésért és Elhana Dycknek a kézíratszerkesztésért – mindketten a Groundwater Project, Guelph, Ontario, Kanada részéről. Köszönet Eileen Poeternek (Colorado School of Mines, Golden Colorado, USA) a kézirat- és a tördelőszerkesztésért és a könyv előállításáért. A borítókép a Waterloo Hydrogeologic Visual MODFLOW Flex szoftverével készült.

1 Áttekintés

A felszínalatti vízáramlás szimulációjának elengedhetetlen része a geológiai modell. A kőolajipar geológiai modellező módszerei fejlettebbnek tekinthetők, mint a felszínalatti vizekkel foglalkozó iparágaké, ezért a Groundwater Project kiadta ezt a könyvet, amely a kőolaj és a víz perspektívájából is áttekinti a felszínalatti áramlásmodellezés alapvető folyamatait. A kőolajipar kereskedelmi érdekei miatt, a fő fókusz a fluidum térfogatának, hozamának és a kitermelésének megbízható szimulációjára összpontosul. A könyvben leírt módszerek, így különösen a *nettó* vagy *tényleges vastagság* (a fluidum áramlását fenntartó durvább szemcséjű rétegek vastagsága) és a *teljes vastagság* (a határoló rétegek közötti teljes vertikális vastagság) viszonya, nem csupán a kőolaj kitermelése, de a vízhozamok szimulációja szempontjából is fontosak, mert azok érdekesekek a vízadó rétegek tározási térfogatát megbecsülő vízkészlet modellezők számára is.

A szennyeződés sorsát és terjedését szimuláló numerikus modellek a geológia részletesebb leírását igénylik. Ilyen esetekben, mivel a szennyező anyagok a nagy szivárgási tényezőjű zónákat összekötő preferenciális útvonalak mentén mozognak, és számos transzport folyamat az eltérő vegyi összetételű fluidumoknak az eltérő szivárgási tényezőjű zónák közötti mozgásától függ, szükség van a heterogén geológiai jellemzők eloszlására.

Az itt bemutatott modellezési technikák az üledékes és a kőzetek fizikai mállásának eredményeként létrejött törmelékes vízadókra vonatkoznak, melyek alapvetően kavicsok, homokok, iszapok és agyagok valamilyen kombinációi. Eszerint, beszélhetünk laza (lazán települő, nem cementálódott szemcsék) vagy konszolidált (szilárdan települő, cementálódott szemcsék) vízadókról. A módszerek nem alkalmazhatók repedezett alapkőzetre, karsztra vagy egyéb olyan vízadókra, melyeknél a domináns áramlási útvonal a másodlagos porozitás.

A könyvben a szerző a Waterloo Hydrogeologic által fejlesztett [Visual MODFLOW Flex](#) szoftvert használja. A szoftver leegyszerűsíti a leggyakrabban alkalmazott talajvíz szimulációs eszköz, a USGS [MODFLOW](#) kóddal való modellezést. Egyik előnye, hogy bizonyos mértékű adatmegosztást tesz lehetővé a Schlumberger Petrel programmal, amely az olaj és gázipar egyik sztenderd geológiai modellező szoftvere. A [RockWorks](#) geológiai modellező szoftverrel a földtani anyagok eloszlása került meghatározásra, melyekhez aztán hidraulikai tulajdonságok lettek hozzárendelve, majd a MODFLOW modellrácshoz hozzárendelt modellbemeneti adatokká lettek konvertálva.

2 Bevezetés

A felszínalatti vízmodell tulajdonságainak meghatározását biztosító keretrendszer kidolgozását a hidrogeológusok geológusokkal és mérnökökkel közösen végzik. A munkafolyamat kétlépcsős: statikus modell, melyet egy dinamikus fluidum modell követ. A geológia változatlan tulajdonságait a statikus modell tartalmazza, a dinamikus modell pedig a vízmozgást szimulálja. Abban az esetben, ha az áramrendszer kihatással van a tulajdonságokra, a hidraulikai paraméterek hangolása szintén a dinamikus modellben történik.

A vízkivétel során fellépő nyomáscsökkenés például, a geológiai rétegek kompaktációját okozza, csökkentve szivárgási tényezőt és porozitást (dinamikus tulajdonságok), ezzel egy időben viszont, nem változik a homok és a pala egymáshoz viszonyított mennyisége (statikus paraméterek). A statikus modell geometriai eszközök alkalmazásával készül, szerepe pedig az áramlás szimulátor hidraulikai tulajdonságokkal való feltöltése. A dinamikus modell valamilyen áramlás szimulátorral készül (a felszínalatti vizek esetében, a MODFLOW az egyik ilyen gyakran alkalmazott szimulátor), és a szimulációs eredményeknek a mérésekhez való illesztése révén, ugyanezzel a modellel történik a hidraulikai tulajdonságok hangolása is. Mindez annak érdekében, hogy a modell képes legyen a stresszhatások eredményeként, az áramrendszerben fellépő változások ésszerű előrejelzésére. A statikus modellt korábban rendszerint geológusok készítették, és a dinamikus szimuláció elvégzése céljából azt átadták a mérnököknek. A gyakorlat viszont azt mutatta, hogy a modell kalibrációja szempontjából, ennek az egyirányú folyamatnak számos korlátja van. A dinamikus modell további betekintést enged a geológiába, és a geológia megértése szűkítheti a kalibrációhoz szükséges paramétereket. Ma, a folyamat jóval iteratívabb. A felszínalatti iparágban a modellező gyakran matematikusi, mérnöki és geológusi képesítéssel is rendelkezik, de gyakran szakértőcsapatok vesznek részt a modellek kidolgozásában.

A térképi részletek feldolgozása és a felszínalatti környezet vízádókra vagy hidrosztratigráfiai áramlási egységre való egyszerűsítése miatt, a felszínalatti víz modellek készítése földrajzi szempontból intenzív folyamattá válhat. A regionális és a vízgyűjtő modellezés esetében, ez a fajta egyszerűsítés a legcélszerűbb megközelítés, a munkafolyamatot pedig számos komplex GIS eszközzel megtámogatható. Ezzel szemben, a néhány ezer vagy száz négyzetméter kiterjedésű lokális modellek esetében, az ilyen eszközök és módszerek alkalmazása nehézkessé teheti a folyamatot.

A könyv, a lokális léptékű, azaz a szennyezett terület méretével közel azonos méretű felszínalatti modellek építésére fókuszál, és a kőolaj rezervoárok statikus modellezése keretében alkalmazott fogalmakra épít. Nem helyez előtérbe egyetlen szoftvert sem, mert a munka nagy része elvégezhető papíron, vagy általános kontúrozó szoftverekkel. Számos lényeges fogalom megszületése a modern, grafikus képességekkel rendelkező számítógépek megjelenése előtti időszakra tehető, és idővel nem változott.

A statikus modellezési munkafolyamatot egy hipotetikus szennyezett területre (tesztterületre) megépülő modell lépéseiként ismertetjük. A folyamat egy használható koncepcionális modell jól átgondolt kidolgozásával kezdődik, majd ezt követik azok a lépések, amelyek a koncepcionális modellt 3D numerikus modellé konvertálják, és végül a szerkezeti rendszer alapján elkészülő áramlásmodell létrehozásával zárul.

3 Kontextus és célok

A modellezési folyamat első lépése minden esetben a modellezés céljának a meghatározása kell legyen. Az áramlás és transzport folyamatok viszonylag jól vizsgálhatók analitikai modellekkel is, gyakran akár egy táblázatkezelővel. Ajánlott valamilyen egyszerű papíralapú kezdeti lépés, melynek során a komplex numerikus modell felépítése előtt megválaszolható néhány kérdés. Ha másra nem is jók, az alapos számítások megalapozhatják egy későbbi komplex modellel kapcsolatos alap elvárásokat.

3.1 Koncepcionális modellek

A kármentesítési projekteknél, gyakran hatósági elvárás a szennyezett terület koncepcionális modelljének a felépítése. A koncepcionális modell tartalmazza a szennyezett vízáadó részleteit; a geometriát, a mélységet, a vastagságot, a szivárgási tényező értéktartományát, a mért nyomásviszonyokat, és azon összetevőket, melyek meghatározzák a hidraulikai rendszer működését, mint például a felszíni víztesteket vagy a vízkivételeket. Kisebb területek esetében előfordulhat, hogy a koncepcionális modell megfelel a hatósági elvárásoknak, de nem tartalmaz elég részletet a rendszer működésének előrejelzéséhez és a kármentesítési tervek kidolgozásához. Azok a koncepcionális modellek, amelyek kizárólag vastag és homogén rétegeket tartalmaznak, arra figyelmeztetnek, hogy egy alaposabb áttekintés és értelmezés javíthatja a koncepcionális modellen.

3.2 Lokális geológia

A lokális geológia ismerete minden felszín alatti modellezésnek elengedhetetlen feltétele. Vízkivételi kutak rétegsorai, talajmechanikai vizsgálatok és egyéb publikus, nyers vagy feldolgozott adatok gyakran állnak rendelkezésre. Hasznos lehet a közelben található egyéb területek talajvízes projektjeihez készült jelentéseknek az áttekintése, akár azért, hogy több információt szerezzünk a terület felszín alatti viszonyairól, vagy azért, hogy megismerjük a mások által tapasztalt problémákat.

3.3 Strukturális geológia

Számos szennyezett terület jellemzéséhez fontosak a strukturális geológiai adottságok és adatok megismerése, de azok nem minden esetben elégségesek. A vetők helye nem biztos hogy ismert, és az alapkőzet is gyakran monoton, adott mélységű lapos felszínként szerepel a koncepcionális modellben, holott annak felszíni topográfiája gyakran ennél bonyolultabb. Az alapkőzet felszíne rendkívül fontos azon területeken, ahol víznél nagyobb sűrűségű ún. nem vízfázisú / nem oldott (DNAPL) szennyeződés is jelen van, mert a DNAPL lekerül a kis permeabilitású rétegek szintjéig, és további mozgását részben ennek a felületnek a topográfiája befolyásolja. Vetők szinte mindenhol előfordulhatnak. A Texas-öböl területei például, annak ellenére vetőknek tulajdonítható felszíni deformációkkal

terheltek, hogy Észak-Amerika e része tektonikai szempontból csendesnek tekinthető. A szennyezett területeken a kisebb vetők gyakran beazonosíthatók a meredekebb hidraulikus gradiensek alapján. A könyvben ismertetett teszterület tartalmaz egy kisebb normál vetőt.

3.4 Sztratigráfia

A szennyezett területekre jellemző adathiány kihívást jelent a rétegtani lehatárolás szempontjából is. Az utóbbi években viszont, felismerve, hogy a sztratigráfiai komplexitás hiánya korlátozó tényezője lehet a sikeres kármentesítésnek, egyre több és több rétegtani adat gyűjtésére kerül sor. A talajvíz kitermelésen és injektáláson alapuló kármentesítési módszerek, a kis permeabilitású rétegtani akadályok áramlásgátló hatásai miatt gyakran korlátokba ütköznek. A vékony, finomszemcsés, agyagban és szerves anyagokban gazdag rétegek nagy szennyeződés megkötő képességgel rendelkezhetnek. Azt követően, hogy a jobb permeabilitású rétegeket sikerült a szennyeződéstől mentesíteni, a kötött szennyezés diffúziós úton visszajut a tiszta felszín alatti vízbe, és váratlan koncentrációnövekedést okoz. Ezek a kis permeabilitású rétegek gyakran rejtettek maradnak a klasszikus fúrési technológiákon alapuló feltárások során. Ezzel szemben, az elektronikus furatszelvényező és a nagy felbontású közvetlen előretöréses (direct push) érzékelő eszközök, megfelelő részletességű szelvényeket képesek létrehozni. Mindezek mellett, természetesen szükség van mindazokra a rétegtani elvekre, melyek lehetővé teszik az értelmezést a furatok közötti térrészben. Az olyan irányelvek, mint pl. a Schultz és mások (2017) publikációjában leírtak, részletes munkafolyamatokat tartalmaznak a rétegtani értelmezések készítéséhez.

Az olaj és gáz rezervoárok esetében, számos kiértékelés ülepedési fáciesek összehasonlításával történik (pl. Shepherd, 2009). Az eolikus (homok dűne) fáciesek relatív homogeneitása jobb rezervoár konnektivitáshoz vezet például, mint a rétegzett, erősen szétszabdalt kanalizált mélyvízi turbiditek esetében. A téma még egy teljes könyvnyi elemzést, itt viszont nem foglalkozunk vele, csupán azért említjük, mert a környezetvédelmi projektek profitálhatnak ebből a kérdéskörből. Ismételten hangsúlyozzuk, hogy a talajvízszennyezés projektek gyakran kis területi kiterjedésűek, vagy az adatgyűjtéshez szükséges költségkeret korlátozott, így a rétegtani elemzés sem lehetséges.

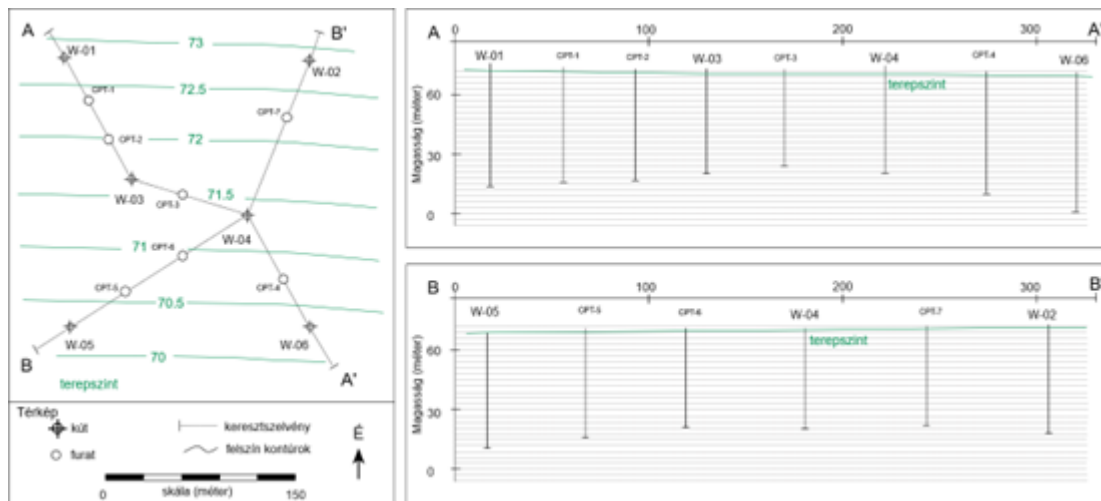
4 A szerkezetrendszer felépítése

A statikus modellezés alapját a geometriai keretrendszer képezi, ami a furatokhoz viszonyítva, háromdimenziós rendszerbe helyezi a szennyezett területet.

4.1 Térképek és keresztmetszvények

Éveken keresztül, a statikus modellezés keretrendszerét a térképek és a keresztmetszvények jelentették. A modern számítógépes szoftverek megjelenésével, mindez immár a térbeli koncepciómodellek létrehozását is lehetővé tevő, vonzó 3D környezetben történik. Ettől függetlenül, a térképek és keresztmetszvények, több szempontból továbbra is a 3D interpretációk alappilléreit képezik. Példánkban, hagyományos térképeket és keresztmetszvényeket használunk az értelmezés során.

A teszterület kb. 9 ha kiterjedésű, és feltárása 14 furattal történt. A furatok két, hozzávetőlegesen egymásra merőleges szelvény mentén található, és laza üledékes összleteket harántolnak. A furatok alját az alapkőzet képezi. A terepfelszín a tengerszint felett 70-73 m közötti magasságintervallumban változik, déli lejtéssel. Az alapkőzet 40 és 70 m közötti mélységintervallumban található. Az értelmező rendszer geometriai részletei az 1. ábrán láthatók. A két keresztmetszvény közvetlenül a térkép mellett van, és minden rajz méretarányos.



1. ábra - Az értelmezési keretrendszer (Brandenburg, 2020).

4.2 Felületek

A geológiai értelmezés magába foglalja a felszín alatti összletek rétegekre való felbontását. A rétegtanosok, geológiai időket reprezentáló horizontokkal és zónákkal dolgoznak, a szerkezeti geológusok eredetileg horizontális felületeket igyekeznek azonosítani, a geofizikusok pedig, egymással ellentétes akusztikus kőzettulajdonságokkal rendelkező rétegeket keresnek. A módszertől függetlenül, a háromdimenziós felületek szerkesztése a geológiai modellezés fontos részét képezi. Ennek a legrobosztusabb módját

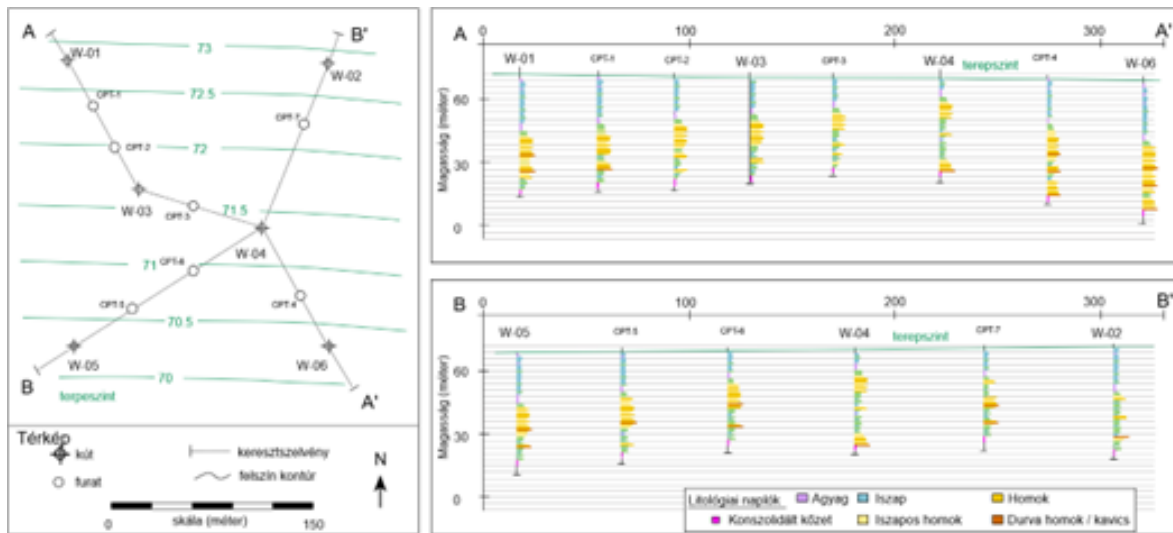
a kérdéses felületet definiáló adatok kontúrozása, azaz a strukturális kontúrok létrehozása képezi: a kérdéses geológiai felületet definiáló felületet azonos magassági kontúrokkal ábrázoló térképek. A szerkezeti kontúrtérképek a topográfiai térképek analógjai.

A kézzel való kontúrozás (**2. ábra**), a számítógépes algoritmusokon alapuló módszerekkel ellentétben, azzal az előnnyel jár, hogy beépíti a geológiai jellemzők emberi értelmezését is, míg a szoftver nem rendelkezik a ritka adatsűrűségű területek értelmezéséhez szükséges józanésszel. A kézi kontúrtérképek a szoftveres térképek minőségi ellenőrzésére szolgálnak, főleg a törések által szabdalta, nem folytonos felületek esetében.



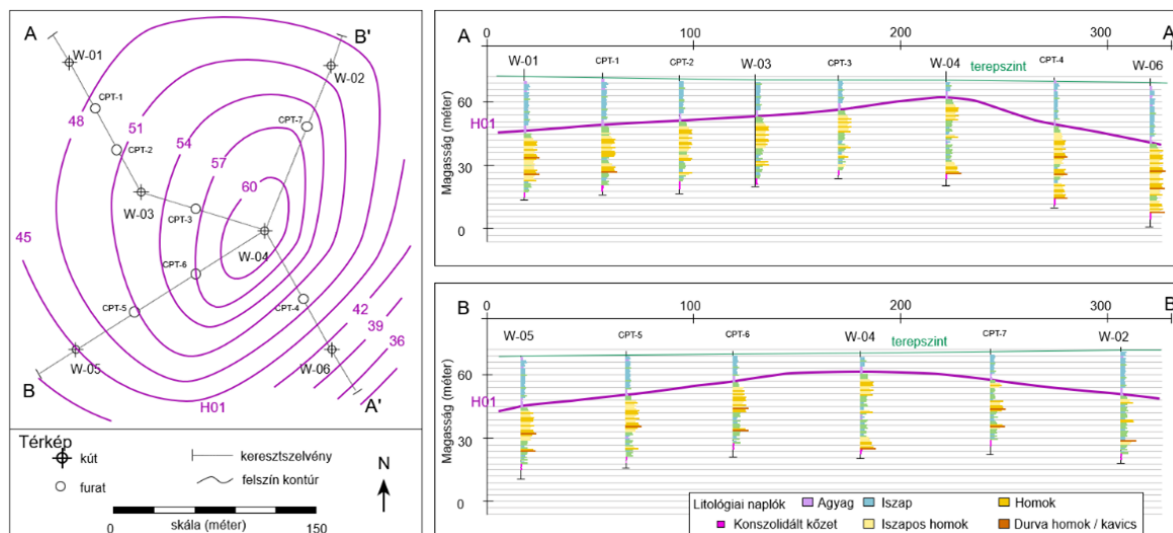
2. ábra - A szerkezeti kontúrok kézzel való szerkesztése a geológiai interpretáció megbízható eszköze (Brandenburg, 2020).

A teszterületen minden furatnak részletes litológiai naplója van, melyek a fúrás során gyűjtött minták és érzékelő eszközök adatai alapján készültek (**3. ábra**). A litológiai naplók CPT (Cone Penetrometer Test) segítségével készültek: a módszer a fúrásban harántolt laza üledékek mechanikai tulajdonságváltozásának közvetlen érzékelésén alapul. A CPT-t gyakran alkalmazzák környezetvédelmi felmérések során, és egyik előnye, hogy a naplózás diszkrét intervallumokban történik (a görbe nem folytonos). A teszterületen, a diszkrét litológiai naplók az alapkőzetet, valamint agyag, iszap, homok és kavics hat különböző osztályát különböztetik meg.



3. ábra - A teszterület diszkrét litológiai naplói. A felületkontúrok a tengerszint feletti terepszintet jelölik (Brandenburg, 2020).

A naplók elemzése, az alapkőzet kiemelkedése felett elvékonyodó, felfelé finomodó üledékeket tár fel. Az azonosított fontosabb felületek az alapkőzet teteje, és egy oldalirányban folytonos agyag, amely elválasztja egymástól a durvább rétegeket a sekélyebb iszapoktól és agyagoktól. A monitoring kutak létesítése során megfigyelt enyhén ártézi viszonyok alapján, az agyagréteg félig áteresztő vízzáróként viselkedik, amelyet a 4. ábrán a H01 jelölésű sztratigráfiai horizont ábrázol. A régió más területeinek ismert jellemzői alapján, a horizont közel szimmetrikus antiklinálisként ábrázolható.

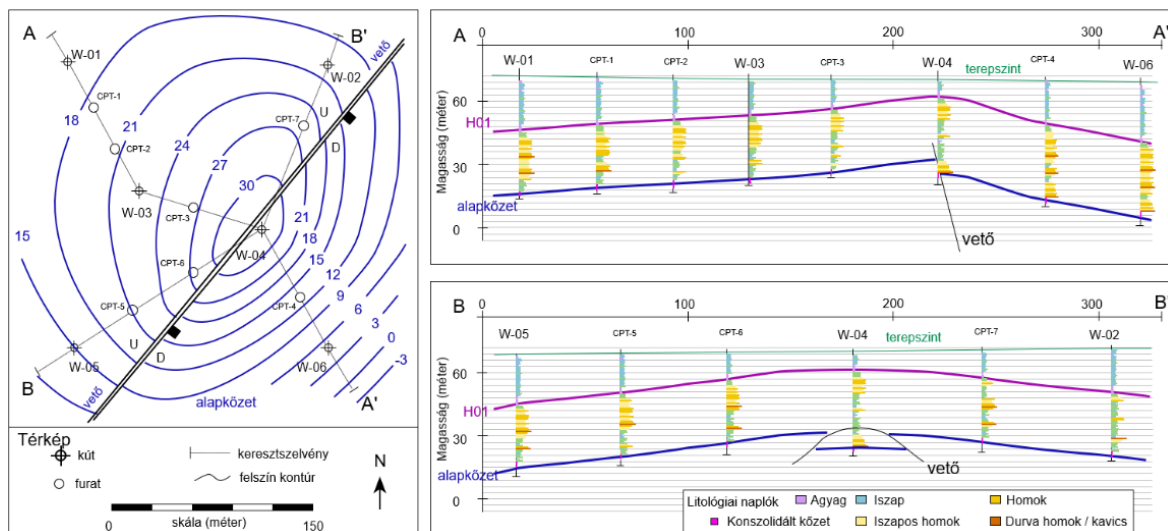


4. ábra - H01 sztratigráfiai horizont. A felületkontúrok a H01 horizont tengerszint feletti magasságát jelölik (Brandenburg, 2020).

Ismert az alapkőzet északkelet-délnyugat irányú, normál vetők mentén való töredezettsége. A letörést, a W-04 furat aljában egy durva szemcséjű egység alapján sikerült azonosítani, amely a többi furatban nem azonosítható. A H01 horizont és az alapkőzet közötti rétegvastagság a W-04, a CPT-7 és a W-02 helyeken nagyobb, mint a CPT-6, a CPT-5 és a W-05 helyeken, ami arra enged következtetni, hogy ez egy lisztikus vető és

valószínűleg nem éri el a H01 szintjét. Ennek következtében, az 5. ábrán látható módon, az alapkőzet felszínének eltolására van szükség.

Ez a fajta eltemetett vetős letörés, főleg tektonikailag aktív területeken gyakori, mint például az Amerikai Egyesült Államok nyugati részén. A furatokban azonosított törések értelmezése szintén gazdag téma, ami túlnyúlik e könyv tematikáján. A vető jelenléte a teszterületen abból a szempontból érdekes, hogy a vetődési oldalon vastagabb a homokos ösztlet. Ha ez a szempont fontos lenne a projekt szempontjából (pl. DNAPL szennyeződés előfordulása esetén), olyan geofizikai módszereket lehetne alkalmazni, amelyek érzékenyek az üledék/alapkőzet érintkezési felület mélységére.



5. ábra - Az alapkőzet tetejét meghatározó strukturált felület. A felületkontúrok az alapkőzet tengerszint feletti magasságát jelölik. A törésvonalon keresztül a kontúrok nem folytonosak (Brandenburg, 2020, gw-project.org).

A kőolajiparban a statikus modellek a rezervoár azon részére fókuszálnak, amelyben az áramló fluidum található. Példánkban, a teszterületen számunkra érdekes rész az alapkőzet és a H01 horizont közötti intervallum. Az olaj- és gázkészlet becslésekben a két felület közötti kőzettér fogat képezne magát a rezervoárt; itt vízádóként hivatkozunk erre. Számos talajvízes projektben a finomszemcsés anyagok tulajdonságai azért fontosak, hogy jellemeznünk tudjuk azok víztároló és vízleadó képességét, vagy azok kémiai adottságait és a vegyi anyagoknak diffúziós úton történő terjedési potenciálját.

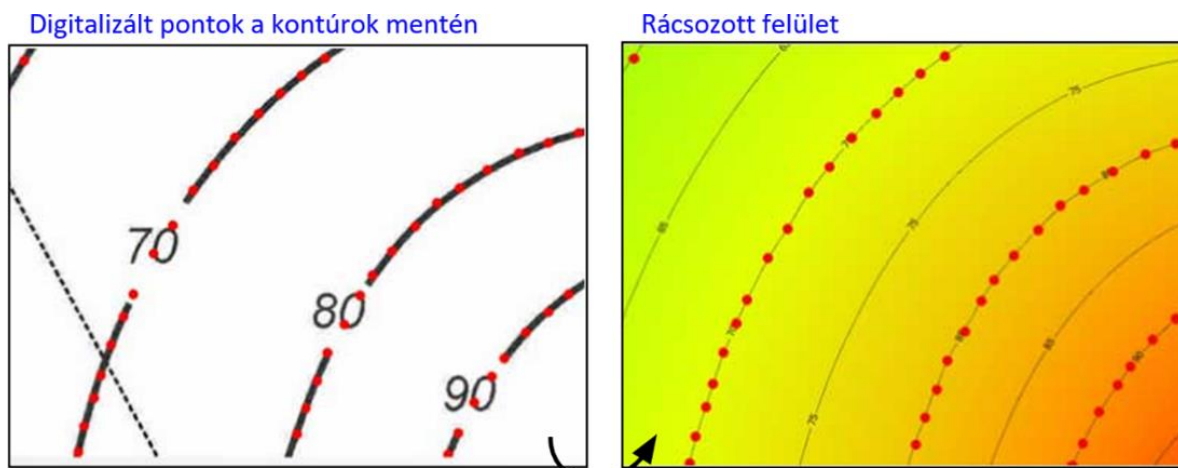
4.3 Rácsozás

A következő lépésben, a keresztmetszvények mentén definiált felületeket interpolációval (a továbbiakban rácsosítás) két-dimenziós felületté kell kiterjeszteni. Ennek eredményeként, mindkét kérdéses felület esetében, egy szabályos rács cellaintervallumaiban a teljes területre megkapjuk az adott pontban érvényes szintet, amire szükségünk lesz a három-dimenziós szimulációk során. A legegyszerűbb rácsépítési módszer, az algoritmus input adataiként a pontszerű megfigyelési helyeken azonosított rétegszinteket használja, és olyan kereskedelmi forgalomban kapható programokkal

végezhető el, mint az [EVS](#) vagy a [Surfer](#). A programok elsősorban megjelenítési célokat szolgálnak, de alkalmazhatók a modellekhez szükséges rácsozott felületek létrehozásához.

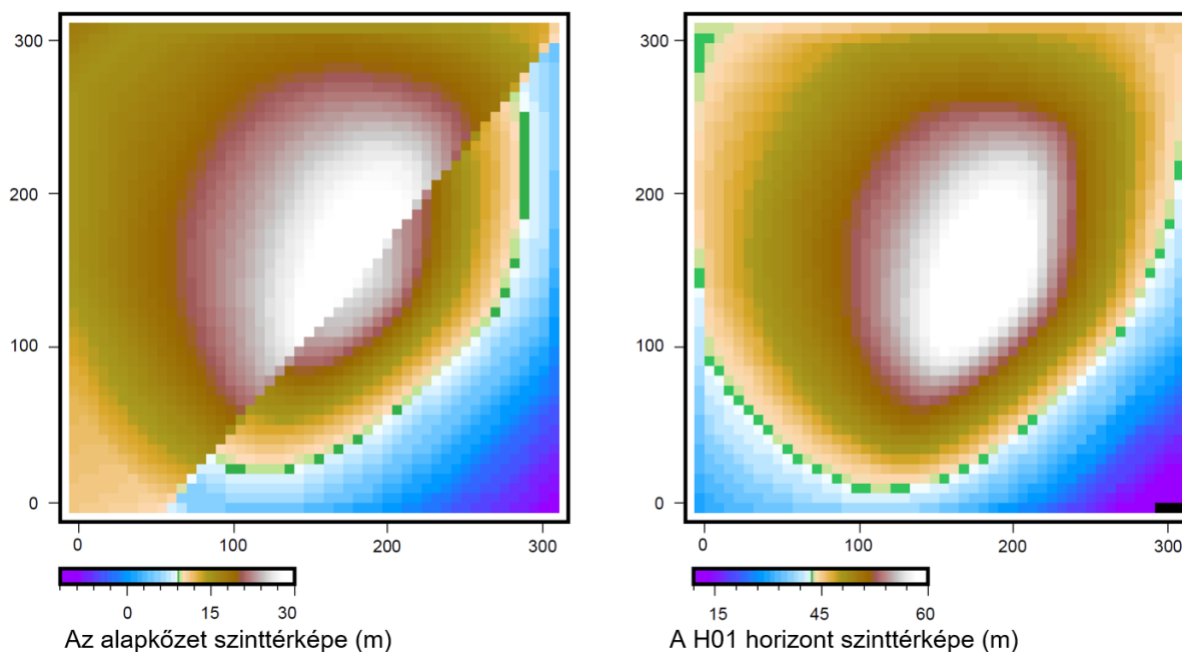
Az input adatok minősége nagyon fontos ebben a folyamatban. Az ideális adatkészlet egymástól egyenlő távolságra lévő pontokat tartalmaz, lefedi a teljes rácsozandó területet, és megtörtént a szűrése és a validációja. Egy ilyen adatkészlet alapján, a legtöbb algoritmus azonos felületet generál. A szórványos, nem szabályos elhelyezkedésű és következtelen adatok a geológiai modellezés jelentős hibaforrásai, mely esetekben a különböző rácsozási algoritmusok eredményei nagymértékben eltérhetnek az inkonzisztens és a kilógó adatok miatt. Néhány gyakran alkalmazott módszer olyan képződményeket generál, mint az ökörszemek egy-egy egyedi pont körül, vagy az eredeti adatokon jóval túlnyúló felületek ([példáért ld. az 1. keretet](#))

A szórványos és szabálytalan adatok esetében, szisztematikus és geológiai megalapozott módszerre van szükség a rácsozási algoritmus vezetéséhez a megfigyelések közötti fehér területek mentén. Az ilyen típusú geológiai modellezésre alkalmas szoftverek például a [Visual MODFLOW Flex](#) és a [RockWorks](#). A teszterületen, egy viszonylag egyszerű, speciális szoftvert nem igénylő módszert alkalmaztunk, melynek során a kézzel szerkesztett kontúrok digitalizált térképéhez adtunk hozzá további pontokat a rácsozási algoritmus számára (**6. ábra**).



6. ábra - A rácsozási algoritmusok irányítást igényelnek a kis adatsűrűségű területeken. A kézi szerkesztésű kontúrokat bedigitalizáltuk, hogy a rácsozási algoritmus számára pontokat szolgáltatassunk (Brandenburg, 2020).

A teszterület modellben, digitalizáltuk a kézi kontúrokat, majd 50 x 50 rácsebontással rácsoztuk (a rácscellák kb. 6 m x 6 m nagyságúak). A könyvben, a további számítások során az '50 x 50 rács' lesz használatos.



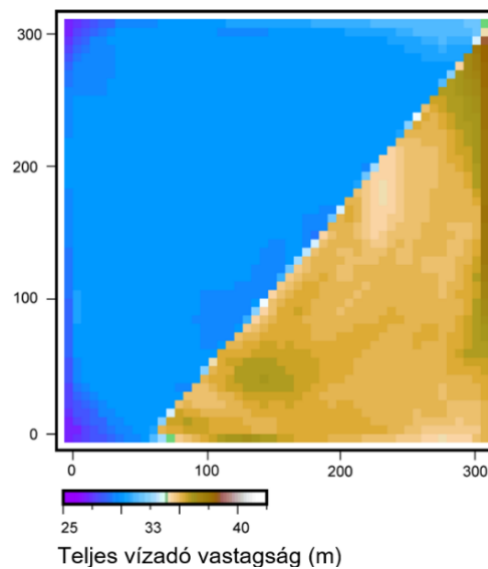
7. ábra - Az alapkőzet (balra) és a H01 (jobbra) tetejének rácsozott felülete. Minden négyzet a felület szintjének interpolált értéke, melynek nagyságát szín jelzi. Az ábrák az Open-Source Generic Mapping Tools ([GMT](#)) programmal készültek (Brandenburg, 2020).

5 Tulajdonságok számítása

A három-dimenziós szerkezet meghatározását és rácsozását követően, a következő lépés a rácsnak a szimulációhoz szükséges hidraulikai paraméterekkel való feltöltése.

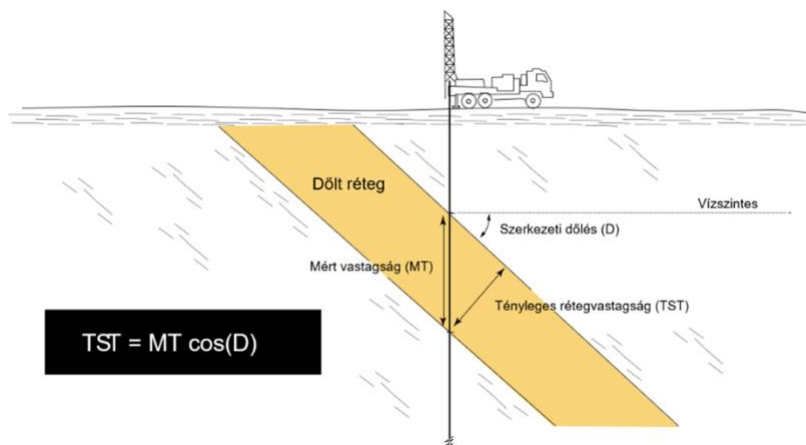
5.1 Teljes vastagság

A legegyszerűbb tulajdonság a rezervoár/vízadó vastagsága, ami megfelel a határoló felületek közötti vertikális távolságnak (8. ábra).



8. ábra - A rácsozott vízadó vastagsága egyenlő a H01 és az alapkőzet közötti különbséggel (Brandenburg, 2020).

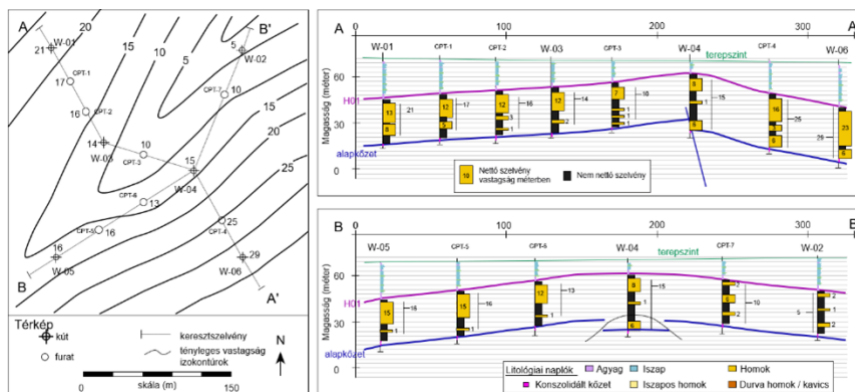
Dőlt vagy redős rétegek esetében, trigonometriai korrekcióra lehet szükség (9. ábra). A teszterületen a szerkezeti deformáció viszonylag csekély, így nem kell korrekció.



9. ábra - Dőlt réteg valós rétegvastagságának számítása furat adatok alapján (Brandenburg, 2020).

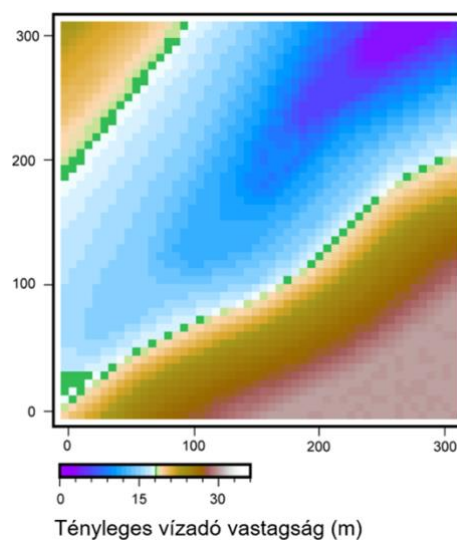
5.2 Tényleges (nettó) vastagság

Az agyagok és azzal rokon kőzetek, mint például a palák, nagy térfogati, de nem összefüggő porozitással rendelkeznek, és a vízáadó olyan részeit képezik, amelyek nem vesznek részt az aktív vízáramlásban, viszont fontosak a szennyezett területek feltárása során (Payne et al., 2008). A vízáadó vagy rezervoár aktív részét az un. „nettó szelvényként” azonosítjuk. Ennek meghatározásához kiválasztunk egy szemcse durvasági határt, és a geológiai naplókat tényleges vagy nettó (durva üledékek) és ettől eltérő (finomszemcsés üledékek) zónákra osztjuk. Mindegyik naplónak megfeleltetünk egy tényleges vastagságot, majd ezek alapján elkészítjük a 10. ábrához hasonló tényleges vastagság kontúrtérképeket. Az ilyen térképtípus az un. vastagság- vagy isopach térkép, melyen az izokontúrok az azonos vastagságot jelölik.



10. ábra - A tényleges vastagság számszerűsítése osztályozott naplók alapján és a vastagságtérkép (Brandenburg, 2020).

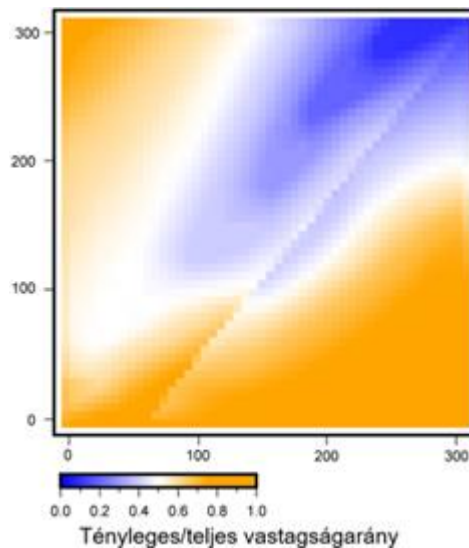
Ezt követően, az előző lépésekben a horizontokra ismertetett módszerrel megtörténik a vastagságtérkép rácsosítása (11. ábra).



11. ábra - Rácsozott tényleges vastagságtérkép (Brandenburg, 2020, gw-project.org).

5.3 A tényleges/teljes vastagságarány

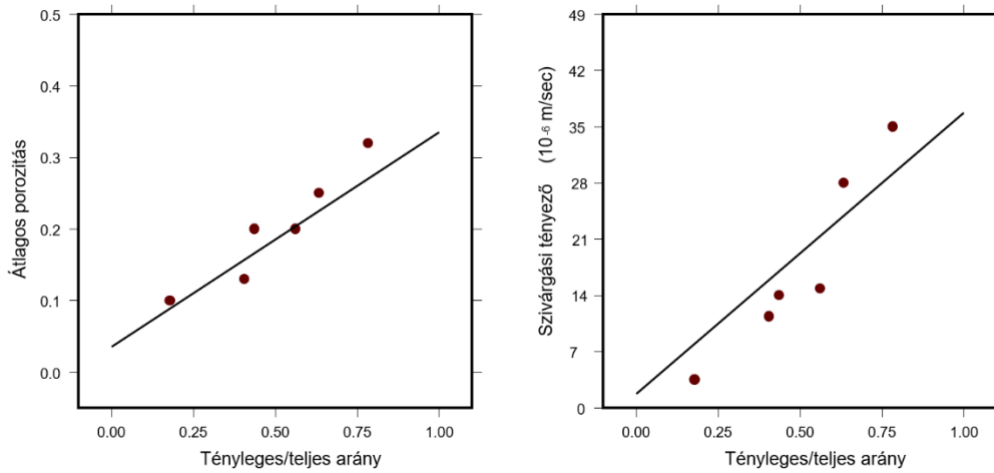
Ha a tényleges és a teljes vastagságtérképek rendelkezésre állnak, kiszámítható a kettő aránya. A tényleges vastagságot elosztva a teljes vastagsággal megkapjuk a tényleges/teljes vastagságarányt, ami egy 0 és 1 közötti érték (**12 ábra**). Az üledési fáciesektől függetlenül, a nagy tényleges/teljes arányú rétegek többnyire permeábilisek és hidraulikailag jól csatoltak. Ezzel szemben, a kis tényleges/teljes arányú rétegek esetében lehet arra számítani, hogy egy-egy kút környezetében jó permeabilitásúak, de nagyobb valószínűséggel egymástól leválasztott tartományokra osztottak.



12 ábra - Rácsozott tényleges / teljes vastagság arány (Brandenburg, 2020).

5.4 Tulajdonságok

Az olaj és gáz rezervoárok kiértékelésében, a törmelékes rezervoárok tényleges/teljes vastagságarányáról tudott, hogy az megbízhatóan korrelál egyéb rezervoár tömbtulajdonságokkal. A porozitást és a permeabilitást, az adott mezőre specifikus egyedi interpolációs függvényekkel, gyakran közvetlenül a tényleges/teljes vastagságarányok alapján térképezik. A teszterületen a porozitást és a szivárgási tényezőt, a tényleges/teljes vastagságarány és a 13. ábrán látható permanens monitoring kutakban mért porozitás és szivárgási tényezők közötti korreláció alapján becsültük.



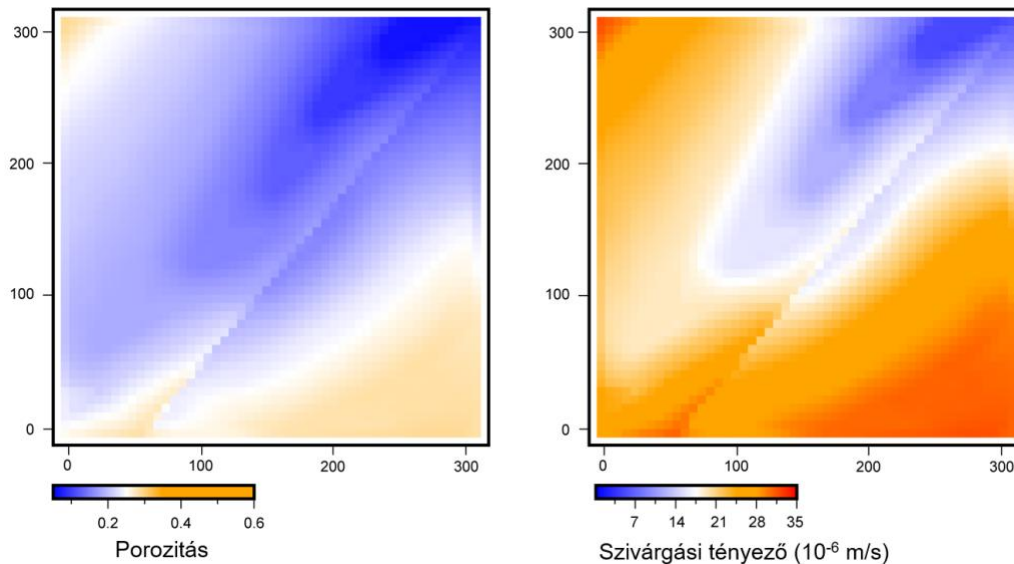
13. ábra - A kutakban mért tényleges/teljes vastagságarány és a mért porozitás, valamint a szivárgási tényező közötti összefüggés (Brandenburg, 2020).

A 13. ábrán látható egyenesek egyenletei (1 és 2 egyenlet):

$$\text{Porozitás} = \phi = 0,3 \left[\frac{N}{G} \right] + 0,035 \quad (1)$$

$$\text{Szivárgási tényező} = K = (35 \times 10^{-6}) \left[\frac{N}{G} \right] + (1,8 \times 10^{-6}) \quad (2)$$

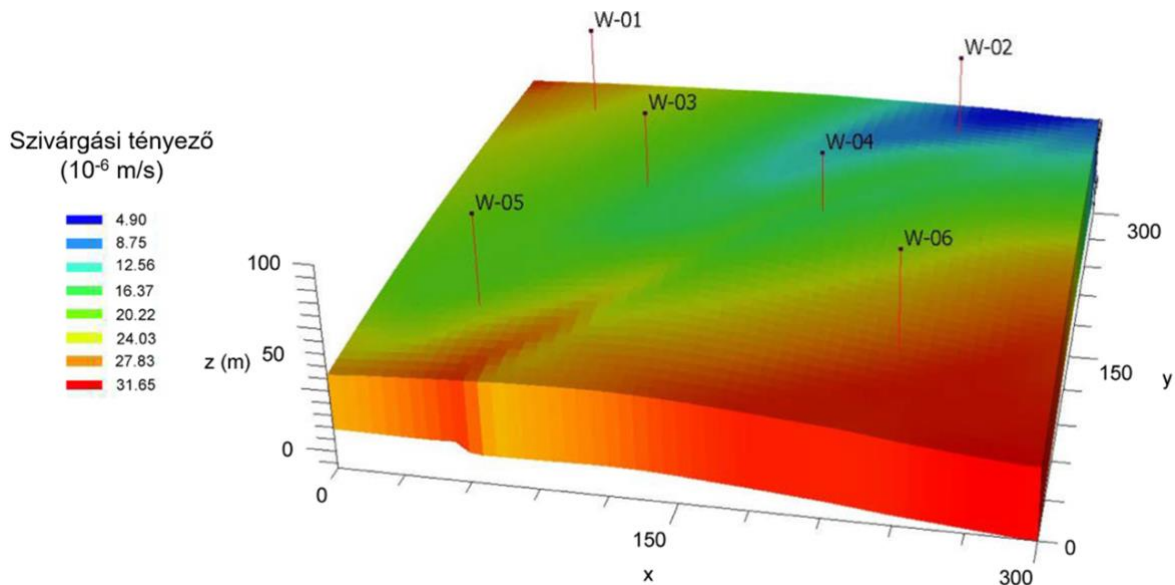
Ha a fenti összefüggések megvannak, a tényleges/teljes vastagságarány alapján kiszámíthatók a vízadóra vonatkozó tulajdonságok a 50x50 rács összes cellájára (**14. ábra**).



14. ábra - Az 1 és 2 egyenletek alapján számolt rácsozott porozitás és szivárgási tényező értékek (Brandenburg, 2020).

6 A modell

A **15 ábrán** látható modell Visual MODFLOW Flex környezetben készült. A modellrács az előző részben számított porozitással és szivárgáshidraulikai tényezőkkel van feltöltve.



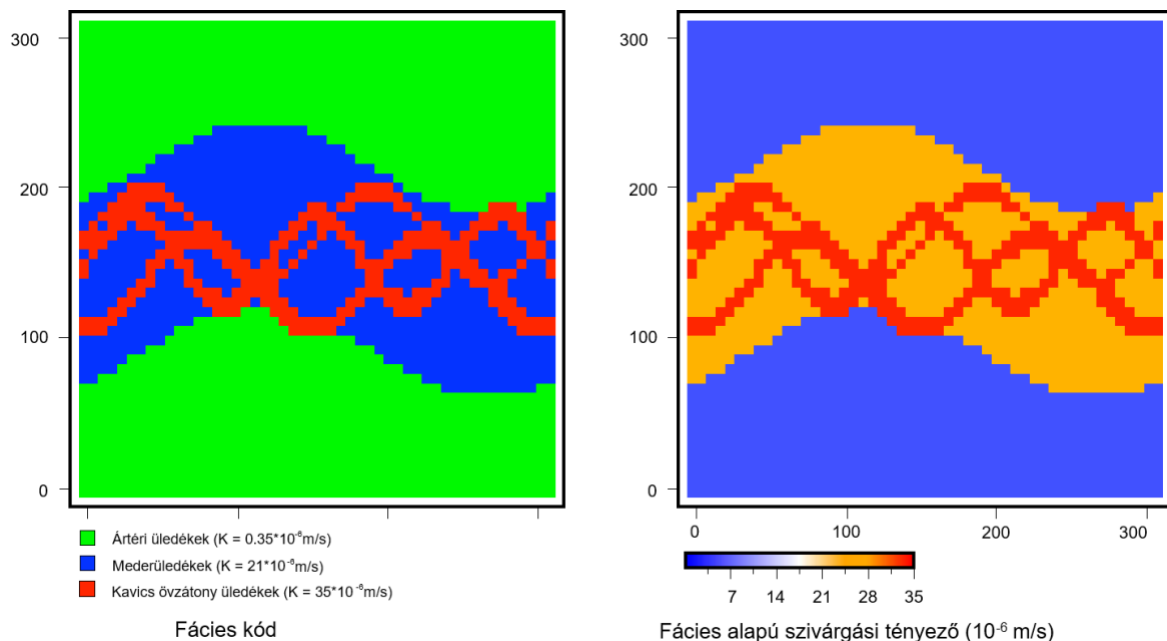
15 ábra - A háromdimenziós modellrácsra térképezett szivárgáshidraulikai tényezők a Visual MODFLOW Flex szoftverben (Brandenburg, 2020).

Ezen a ponton a modell készen áll a dinamikus szimulációkra. Fontos megjegyezni, hogy ezt a modellt kimondottan a felszínalatti környezet, furat adatokon alapuló térképezése alapelveinek bemutatása céljából hoztuk létre. Modellünk egyrétegű, viszont a szivárgáshidraulikai modellek jellemzően többrétegűek. Általában több vízadóból álló rendszereket szimulálnak, melyek esetenként mérnöki létesítményeket és/vagy komplex geológiai heterogeneitást is tartalmaznak főleg akkor, ha kármentesítés vagy szennyeződésterjedés szimulációjára is szükség van.

Többrétegű modelleknél a réteghorizontok a könyvben leírt módszerekkel modellezhetők. Alkalmazhatók geostatistikai módszerek is; több modellezői felhasználói felület lehetővé teszi például, hogy a szivárgáshidraulikai tényezőt vagy egyéb modelltulajdonságokat a mért értékek között interpolációval (pl. Krigelés) becsüljük.

7 Statikus modell szerkesztése fácies térkép alapján

A statikus kőolaj modelleknél, a heterogeneitás azonosítására gyakran használt módszer a fácies térképezés. A geológiai fáciesek olyan kőzet, üledék vagy talaj csoportok, melyeknek azonos a geológiai keletkezési története, ami ebben a kontextusban azonos hidrológiai viselkedést jelent. Egy folyóvízi rendszerben például, az árterületi üledékek többnyire nagy mennyiségű finomszemcsés, rétegzett iszapot tartalmaznak, melyek kis szivárgási tényezőt és egynél jóval kisebb vertikális-horizontális szivárgási tényező arányt eredményeznek. Ezzel szemben, az övzátonyok szivárgási tényezője nagy, a vertikális és a horizontális szivárgási tényezők aránya pedig közelít az egyhez. A fácies térképezésben, mindegyik rácscellához egy fácies kódot kell hozzárendelni, melyet aztán egy hozzátartozó hidraulikai paraméterkészlethez lehet kapcsolni (16. ábra).

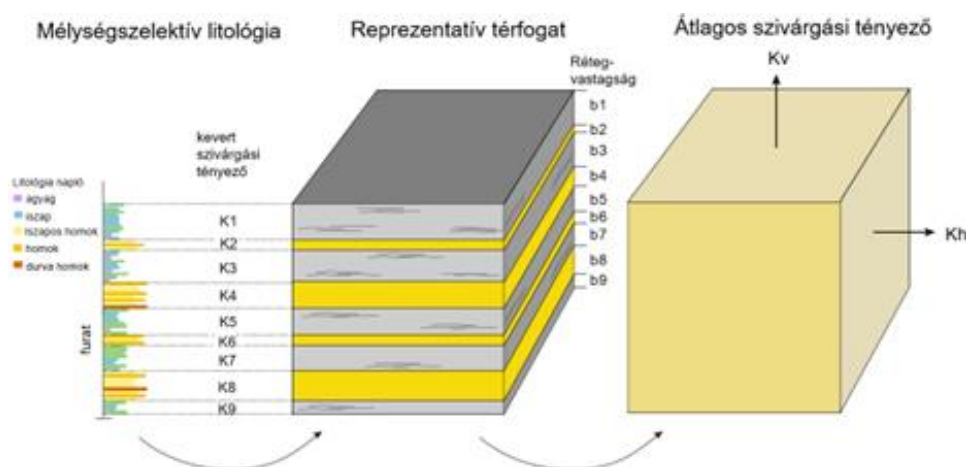


16. ábra - Fácies térképezésből származtatott szivárgáshidraulikai tényezők (Brandenburg, 2020).

Természetesen, a fáciesek csak a furatban ismertek; a többit valamilyen módszerrel kell meghatározni. A legegyszerűbb esetben, a hozzárendelés a modellező intuíciója alapján történik. Számos eltérő, de azonos mértékben érvényes fácies térkép is szerkeszthető. Ez az alapja a fejlettebb geostatistikai modelleknek, melyek egyszerre honorálják a statisztikai korlátokat és a geológiai alapelveket. Vannak nagyon komplex modellek, melyek a kőzet kibukkanásokban mért és az egyéb geológiai tanulmányokban megadott heterogeneitás típusokat sokkal nagyobb részletességgel tartalmazzák, mint a szivárgáshidraulikai modell rácsfelbontása. A szivárgáshidraulikai modellhez való felhasználásuk ezért kvantitatív felskálázást igényel, hogy a nagy felbontású szivárgási tulajdonságok a durvább rácsra is érvényesek maradjanak.

8 Statikus modell szerkesztése felskálázott tulajdonságok alapján

A modellrács feltöltésének sokkal közvetlenebb, de munkaigényesebb módja a rendelkezésre álló legrészletesebb adatok felskálázása. Ha a furatokból magminták kerülnek begyűjtésre, a zavartalan talaj és kőzetminták porozitása és szivárgási tényezője meghatározható laboratóriumi körülmények között végzett tesztekkel. Ez lehetővé teszi a litológia és a hidraulikai tulajdonságok közötti centiméteres skálájú korreláció meghatározását. Ezt követően létrehozható egy reprezentatív térfogat, amely a magban megfigyelt fontosabb litológia típusokat követi. Mindegyik réteghez hozzárendelhető egy „kevert” szivárgási tényező, ami az adott litológia laboratóriumi méréseinek a statisztikai átlaga. A rétegekből ezt követően származtatható egy egyenértékű vertikális (K_v) és horizontális (K_h) szivárgási tényező (17. ábra).



17. ábra - Mélység szelektív értékek felskálázása egyenértékű szivárgási tényezőre (Brandenburg, 2020).

Az egyenértékű horizontális szivárgási tényező a kevert rétegek transzmisszivitása alapján számítható ki; 3 egyenlet a 17. ábrán közölt példára.


$$K_h = \frac{K_1 b_1 + K_2 b_2 + K_3 b_3 + K_4 b_4 + K_5 b_5 + K_6 b_6 + K_7 b_7 + K_8 b_8 + K_9 b_9}{b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5 + b_6 + b_7 + b_8 + b_9} \quad (3)$$

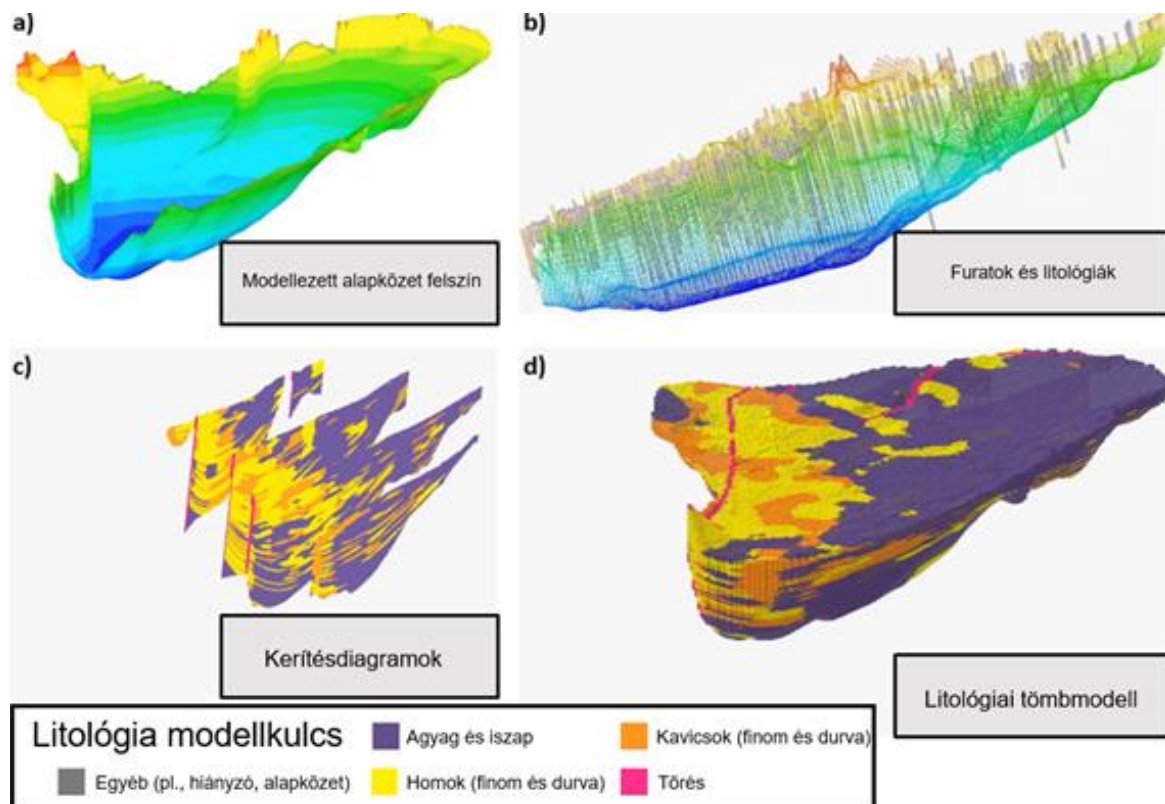
Az egyenértékű porozitás hasonlóan számítható ki. Az egyenértékű vertikális szivárgási tényező kiszámításához alkalmazott képletet a 17. ábrán bemutatott példára a 4 egyenlet mutatja.

$$K_v = \frac{b_1 + b_2 + b_3 + b_4 + b_5 + b_6 + b_7 + b_8 + b_9}{\frac{b_1}{K_1} + \frac{b_2}{K_2} + \frac{b_3}{K_3} + \frac{b_4}{K_4} + \frac{b_5}{K_5} + \frac{b_6}{K_6} + \frac{b_7}{K_7} + \frac{b_8}{K_8} + \frac{b_9}{K_9}} \quad (4)$$

A 4 egyenlet általában a szivárgási irányra merőleges rétegek esetében, a 3 egyenlet pedig, az áramlási iránnyal párhuzamos rétegek esetében alkalmazható. A módszer a furat közvetlen környezetében pontos, de a furatok közötti térrészre szükség van valamilyen szisztematikus módszer alkalmazására. A gyakorlatban, ez többnyire a felskálázás és a stochasztikus modellezési módszerek kombinálásával történik.

9 Statikus modell szerkesztése litológiai adatok alapján

Ha elegendő geológiai adat áll rendelkezésre egy szivárgáshidraulikai modell szerkezetének az elkészítéséhez, a modelltér létrehozásához olyan szoftverek alkalmazhatók mint a [RockWorks](#)⁷. A szoftver képes a teljes modelltérületet lefedő litológia típusok létrehozására, és minden rácscella hidraulikai tulajdonságokkal való feltöltésére (18. ábra). [Ez a video a modell animációs nézetét mutatja be](#) . A 35 másodperces (~80 Mb) animáció 3D-ben elforgatja a medencét, és megmutatja az alapkőzet tetejét, a litológiai eloszlást meghatározó furatok litológiai naplóit, a kerítésdiagramokat néhány keresztmetszvény mentén, és a nyugatról kelet felé, majd a délről észak felé és vissza szekvenciálisan szeletelt végső tömbmodellt. A finomszemcsés anyagok lila, a közepes szemcseméretűek sárga, a durva szemcsés narancsszínűek, a törések pedig vörösek.



18. ábra - Litológiai modell: a) az alapkőzet felületének felszíne; litológiai típusok meghatározása mindegyik furatban; c) néhány kerítészszelvény a litológiai típusoknak a kutak közötti interpolációját és extrapolációját követően; és d) a teljes litológiai modell. A képeket a RockWare szolgáltatta (2020).

10 Összefoglaló

A könyvben bemutatott felszínalatti modellezés fogalmakat a statikustól a dinamikus modellig típusú munkafolyamat szempontjából ismertettük. Minden felszínalatti víz projekt egyedi, ezért az ilyen munkafolyamatokat inkább ajánlott, semmint szigorú tervezési szerkezetként kell tekinteni. A területekre jellemző adathiány okán, a szerkezeti és a sztratigráfiai modellek kezdeti koncepcionálása a folyamat legelső kritikus lépése. A munkafolyamat típusú megközelítés előnye, hogy egy olyan folyamatot biztosít, melynek keretében a bemeneti módosítások és feltételezések végigterjednek a projekt minden szintjén.

Attól függetlenül, hogy a fentebb tárgyalt módszerek egy része csak törmelékes vízádók esetében alkalmazható, a 3D keretrendszerek térképekből, keresztmetszvényekből és kontúrozott felületekből való létrehozási módszere általánosan alkalmazható. A fejlettebb statisztikai és litológiai modellezés továbbra is robusztus 3D keretrendszereken alapul. A 3D rendszerek papíron történő felvázolása egy munkacsoport keretében, kitűnő módja a konszenzusra törekvésnek, az előfeltételek definiálásának és a kommunikáció elősegítésének. A módszer kezdeti lépésként való alkalmazása a modellezési projektekben bevált gyakorlatnak tekinthető.

11 Hivatkozások

Brandenburg, J.P., 2020, Eredeti ábrák.

Payne, F., J. Quinnan, and S. Potter, 2008, Remediation Hydraulics, 1st Edition. Chemical Rubber Company (CRC) Press.

RockWare, 2020, <https://ww.rockware.com/product/rockworks/>.

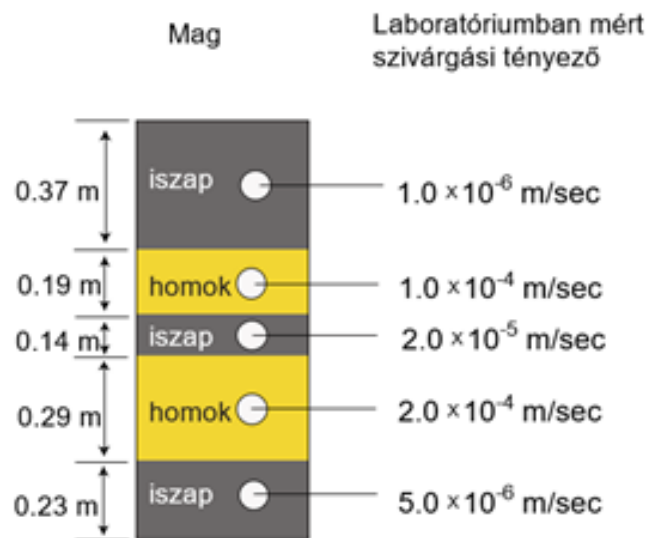
Schultz, M., R. Cramer, C. Plank, H. Levine, K. Ehman, 2017, Best practices for environmental site management: A practical guide for applying environmental sequence stratigraphy to improve conceptual site models. Technical Report. https://cfpub.epa.gov/si/si_public_file_download.cfm?p_download_id=536250&Lab=NRMRL.

Shepherd, M., 2009, Oil field production geology. AAPG Memoir, The American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Oklahoma, volume 91, 350 pages, <https://doi.org/10.1306/M911316>.

12 Gyakorlatok

A fúrás során gyűjtött talaj- és kőzetmagok elemzésének egyik módja, a nagyobb magmintából centiméter méretű minták elkülönítése, és azok hidraulikai tulajdonságainak laboratóriumi körülmények közötti megmérése. Az eredményeknek szivárgáshidraulikai szimulációkban való felhasználása előtt szükséges az átlagolt tulajdonságok kiszámítása.

Induljunk ki az alábbi, rétegzett iszap és homok üledékből vett magmintából. A minta 1,22 m hosszú és vertikális. A szivárgási tényezőt öt kisminta alapján számoltuk ki:



1. gyakorlat

Amennyiben csak a homokon keresztüli áramlás számít, mi a magmintának a tényleges/teljes vastagságaránya?

[Kattints az 1. gyakorlat megoldásához](#) ↓

2. gyakorlat

Mennyi a reprezentatív térfogat számított átlagos horizontális és vertikális szivárgási tényezője?

[Kattints a 2. gyakorlat megoldásához](#) ↓

3. gyakorlat

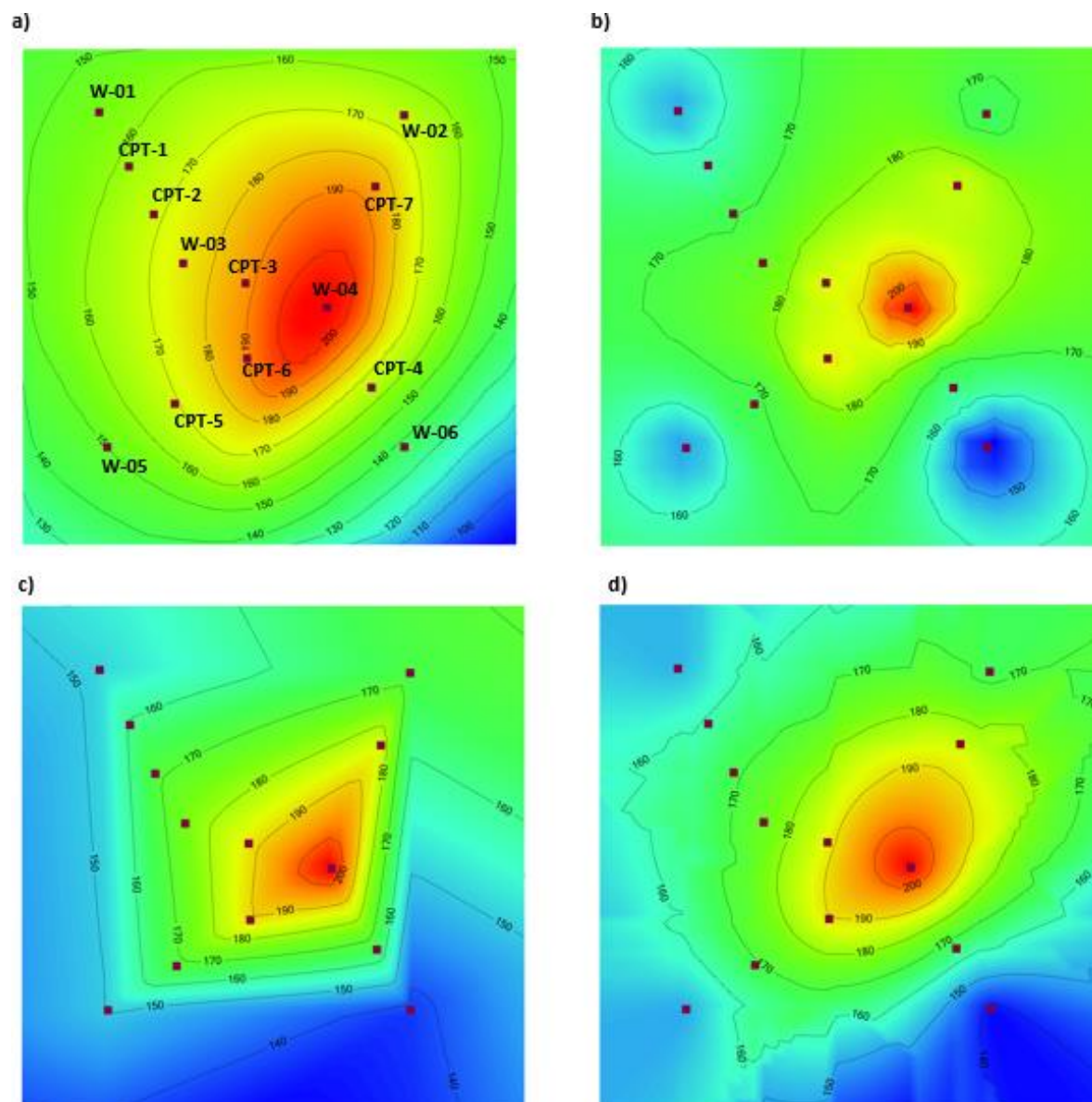
Milyen további információkra van szükség ahhoz, hogy a számított átlagos szivárgási tényezők alapján elkészíthető legyen egy szivárgáshidraulikai modell?

[Kattints az 3. gyakorlat megoldásához](#) ↓

13 1. keret Szórványos adatok rácsozása

Elégséges számú furat adatai alapján, minden rácsozó algoritmus azonos geológiai felület létrehozását kell eredményezze. Szórványos adatok esetében, a felületek egymástól

eltérőek lesznek. A 19. ábra a teszterület H01 felületének, több eltérő módszerrel való rácsozása eredményeit mutatja 14 furat adatai alapján.



19. ábra - A H01 felület rácsozása 14 furat szintadai alapján, a) a geológiai „valóságot” ábrázoló kézzel szerkesztett szerkezeti kontúrok; b) fordított távolság (inverse distance) algoritmus; c) természetes szomszédok (natural neighbors) algoritmus; és d) Krigelés. (Brandenburg, 2020, gw-project.org).

Az ábrák a Visual MODFLOW Flex (Waterloo Hydrogeologic, 2020) szoftverben rendelkezésre álló rácsozási algoritmusokkal készültek, többnyire azok alapbeállításainak alkalmazásával. Egy kis gyakorlattal, a rácsozási paramétereket be lehet állítani úgy, hogy azok a H01 horizonra a várt felületet adják. Ez különösen igaz a Krigelés esetében, amit a szabálytalanul eloszló geológiai adatok rácsozására terveztek. Módszertől függetlenül viszont, a geológiáról alkotott valamilyen előzetes elképzelésre mindig szükség van.

A rácsozási algoritmusok teljesítménye mindig gyengébb a rács peremi részein. Az algoritmusok *interpolálnak* az adatpontok által határolt területen belül, és *extrapolálnak* azon kívül. Az extrapolációnak óhatatlanul nagyobb a bizonytalansága, ami az adatpontoktól távol eső peremek esetén rácsozási „leleményességhez” vezet.

[Visszatérés az 1. kerethez vezető linket tartalmazó szövegrészhez](#) ↑

14 Gyakorlatok megoldásai

1. gyakorlat - megoldás

Amennyiben csak a homokon keresztüli áramlás számít, mi a magmintának a tényleges/teljes vastagságaránya?

$$\text{tényleges/teljes} = \frac{0.19 + 0.29}{0.37 + 0.19 + 0.14 + 0.29 + 0.23} = 0.39$$

[Visszatérés az 1. gyakorlathoz ↴](#)

2. gyakorlat - megoldás

Mennyi a reprezentatív térfogat számított átlagos horizontális és vertikális szivárgási tényezője?

$$Kv = \frac{0.37 + 0.19 + 0.14 + 0.29 + 0.23}{\frac{0.37}{1.0 \times 10^{-6}} + \frac{0.19}{1.0 \times 10^{-4}} + \frac{0.14}{2.0 \times 10^{-5}} + \frac{0.29}{2.0 \times 10^{-4}} + \frac{0.23}{5.0 \times 10^{-6}}}$$

$$\text{Átlagos vertikális szivárgási tényező} = Kv = 2.9 \times 10^{-6} \frac{m}{s}$$

$$Kh = \frac{(1.0 \times 10^{-6} * 0.37) + (1.0 \times 10^{-4} * 0.19) + (2.0 \times 10^{-5} * 0.14) + (2.0 \times 10^{-4} * 0.29) + (5.0 \times 10^{-6} * 0.23)}{0.37 + 0.19 + 0.14 + 0.29 + 0.23}$$

$$\text{Átlagos horizontális szivárgási tényező} = Kh = 6.7 \times 10^{-5} \frac{m}{s}$$

[Visszatérés az 2. gyakorlathoz ↴](#)

3. gyakorlat - megoldás

Milyen további információkra van szükség ahhoz, hogy a számított átlagos szivárgási tényezők alapján elkészíthető legyen egy szivárgáshidraulikai modell?

Ismerni kell, hogyan illeszkedik a magminta a modell geológiai szerkezetébe. Néhány megválaszolendő kulcskérdés: Mi a modell léptéke a magminta léptékéhez képest? A magminta megfelelően reprezentálja a néhány méter vastagságú áramlási egységeket, de ez nem igaz a tíz méteres vastagságú egységekre. A sztratigráfiai horizontok horizontálisak, vagy van mérhető dőlésük? Amennyiben igen, szükség lehet az 5. részben ismertetett dőlés korrekcióra. Ne feledjük, hogy a geológia horizontálisan és vertikálisan is változó, tehát további magmintákra lehet szükség a módszer szigorú alkalmazásához.

[Visszatérés az 3. gyakorlathoz ↴](#)

15 A szerző



Dr. JP Brandenburg geológus a Haley & Aldrich-nél, ahol számos környezetvédelmi, bányászati és vízgazdálkodási alkalmazás keretében végez felszínalatti víz modellezést. Geodinamikai numerikus modellezői karrierjét a Michigani Egyetemen kezdte, ahol a földköpenyben zajló viszkózus konvekciós folyamatokat tanulmányozta. Ezt követően, csatlakozott a Royal Dutch Shell kutatási részlegéhez, ahol a szénhidrogén rezervoárok komplex felszínalatti szerkezetgeológiai modellezési módszereinek

kidolgozása volt a szakterülete. E módszereknek a Shell kutatási és termelési részlegében való több évnnyi alkalmazását követően, figyelmét a környezetvédelmi iparágra irányította át. Az alkalmazott modellezés mellett, szakterületeket átölelő tapasztalatokra építve, a felszínalatti heterogeneitás azonosítását célzó módszerfejlesztési tevékenységet is folytat. Dr. Brandenburgnak számos geodinamikai, kőolaj geológiai, szerkezetgeológiai és numerikus modellezési publikációja jelent meg.

16 A fordító



Jakab András, villamosmérnök és környezetvédelmi szakmérnök, az általa alapított Jakab és Társai Kft. ügyvezetője és szakértője. Fő szakterülete a szivárgáshidraulikai és transzportmodellezés, mely tevékenységet főleg a kármentesítés, az utóbbi időben pedig egyre gyakrabban a vízgazdálkodás és a geotermia területein végzi. Második szakterülete a felszínalatti vízszennyezések kármentesítése, azon belül pedig főleg a DNAPL típusú szennyezések kármentesítési problémáinak megoldásához kapcsolódó tervezési és modellezési feladatok. Modellezési tevékenysége

egyre inkább a nem-determinisztikus megoldások felé irányul, és ezen a területen keresi a további gyakorlati kihívásokat. Az elmúlt nagyjából tíz évben, szakmai tevékenysége során egyre gyakrabban az oktatás irányába is elkalandozik, és számos nemzetközi tanfolyamon oktatott, és jelenleg is oktat modellezéseméleti és gyakorlati kérdéseket. A modellezési tevékenységes során főleg MODFLOW és TOUGH2/AUTOUGH modellezési környezetekben dolgozik, illetve PEST/PEST++ eszközöket alkalmaz a modellkalibráció és az eredmények kiértékelésére és bemutatására.

Az új kiadványok, események és a Groundwater Project-ben való részvétellel kapcsolatos információkért, kérjük fontolja meg a Groundwater Project levelező listára való feliratkozást. A hírlevélre való feliratkozás segíti egy globális felszínalatti vizes közösség kiépítését. [Feliratkozás](#)↗.



Módosítások az eredeti kiadáshoz képest

Általános módosítások General changes:

A gyakorlatok megoldásainak kivételével, az egyenletekből kikerültek a félkövér karakterek. Bold font in equations was removed except for the final answer in the exercise solutions.

A szövegtörzsben szereplő kék színű linkek feketére módosultak. External links in blue font within the body of the book were changed to black font.

A hiányzó helyeken bekerült a külső link szimbólum. The external link symbol was added after links where it was missing.

A hiányzó helyeken bekerült a belső link szimbólum. The internal link symbol was added after links where it was missing.

A hibás könyvjelzők eltávolításra kerültek a navigációs panelből. False bookmarks were removed from the navigation pane.

Specifikus módosítások: Specific changes:

iii oldal, Bekerült az idézet forrása és a könyv DOI száma page iii, Added citation information and the book DOI.

10. oldal, "20 by 20" helyett "50 by 50" page 10, "20 by 20" was changed to "50 by 50"

10. oldal, "20x20" helyett "50x50" page 10, "20x20" was changed to "50x50"

11. oldal, Elválasztójel került a 7. ábra aláírás mezőjében az "Open" és a "Source" szavak közé. page 11, A hyphen was added in the caption of Figure 7 between the words: "Open" and "Source".

15. oldal, "20x20" helyett "50x50" page 15, "20x20" was changed to "50x50"

18. oldal, A 4. egyenlet nevezőjében a b_8/K_5 helyére b_8/K_8 került, és további tényezőként a b_9/K_9 is szerepel page 18, Denominator of equation 4 was corrected to change b_8/K_5 to b_8/K_8 and to include the additional term b_9/K_9

22. oldal, Az utolsó referenciából kikerült egy hibás sortörés. page 22, An erroneous line break was removed from the last reference.