Uloga GIS-a u pripremi zaštite podzemnih voda u aluvijalnim vodonosnicima

Dobranić, Mišel

Master's thesis / Diplomski rad

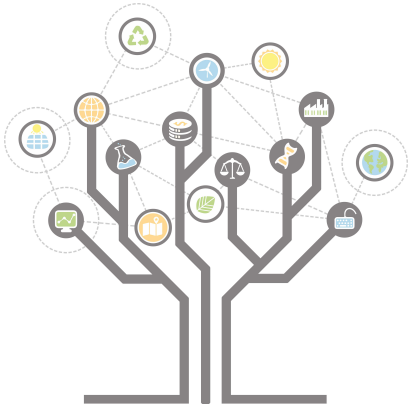
2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:540884

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**



Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations

zir.nsk.hr

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Uloga GIS-a u pripremi zaštite podzemnih voda u aluvijalnim vodonosnicima

Dobranić, Mišel

Master's thesis / Diplomski rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:829822

Rights / Prava: In copyright

Download date / Datum preuzimanja: **2020-11-04**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

MIŠEL DOBRANIĆ

ULOGA GIS-a U PRIPREMI ZAŠTITE PODZEMNIH VODA U ALUVIJALNIM VODONOSNICIMA

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

ULOGA GIS-a U PRIPREMI ZAŠTITE PODZEMNIH VODA U ALUVIJALNIM VODONOSNICIMA

DIPLOMSKI RAD

KANDIDAT:
Mišel Dobranić

MENTOR:
Doc. dr. sc. Hrvoje Meaški

VARAŽDIN, 2017.

Zahvala:

Zahvaljujem svojim roditeljima, sestri i djevojci na razumijevanju te riječima podrške tokom mojeg akademskog obrazovanja.

Posebnu zahvalu posvećujem, doc. dr. sc. Hrvoju Meaškom, koji mi je svojim savjetima i potporom pomogao u izradi i oblikovanju ovog diplomskog rada te na strpljenju i prenesenom znanju tokom studiranja.

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom

ULOGA GIS-a U PRIPREMI ZAŠTITE PODZEMNIH VODA U ALUVIJALNIM VODONOSNICIMA

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **doc.dr.sc. Hrvoja Meaškog**.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 11.09.2017.

MIŠEL DOBRANIĆ
(Ime i prezime)

Dobranić Mišel
(Vlastoručni potpis)

SAŽETAK RADA

Vodu kao čovjekov najvažniji prirodni resurs potrebno je u što većoj mjeri zaštiti od upravo njega samog i njegovog utjecaja. Zbog svojih svojstava i mogućnosti „samopročišćavanja“ podzemna voda je vrlo značajan izvor pitke vode. Da bi vodu mogli eksploatirati bez većih onečišćenja bitno se pridržavati zakona, pravila i propisa vezanih uz zaštitu podzemnih voda i zaštitu samog izvorišta. Kao krajnji produkt geoloških, hidroloških, hidrogeoloških te mnogih drugih istraživanja su odluke o zonama sanitarne zaštite koje štite područje oko zdenaca ili izvorišta i područje napajanja zdenaca koje je povezano s tim zdencem. Kod određivanja zona sanitarne zaštite izvorišta, kao i tijekom procesa novelacije postojećih zona. Geografski informacijski sustav (GIS) je jedan od neizostavnih alata i velika pomoć u hidrogeološkim istraživanjima. GIS se koristi u svim fazama istraživanja, bilo kod prikupljanja i organizacije podataka, zatim kroz mogućnosti provođenja prostornih analiza te povezivanja i kombiniranja slojeva (podloga). Krajnji rezultat takvog istraživanja je kartografski prikaz određenih zona sanitarne zaštite izvorišta, također izrađen pomoću GIS-a. Kao jedno od mogućnosti GIS-a su i izrade karata ranjivosti, rizika i opasnosti. Aluvijalni vodonosnici se matematički i numerički mogu lakše opisati i pratiti za razliku od krških. Zbog toga bi se moglo u budućoj primjeni GIS-a kod zaštite podzemnih voda u aluvijalnim vodonosnicima implementirati određeni modeli unutar GIS-a te određene metode koje bi još poboljšale zaštitu podzemnih voda u cjelini.

KLJUČNE RIJEČI

podzemne vode, zaštita aluvijalnih vodonosnika, ranjivost vodonosnika, GIS

SADRŽAJ

1 UVOD ... 1
2 OSNOVNE ZNAČAJKE ALUVIJALNIH VODONOSNIKA ... 3
3 ZAŠTITA ALUVIJALNIH VODONOSNIKA ... 7
3.1 Osnovne pretpostavke učinkovite zaštite ... 9
3.2 Primjeri zaštite aluvijalnih vodonosnika u svijetu ... 11
3.2.1 Nizozemska ... 11
3.2.2 Australija ... 15
3.2.3 Kanada ... 20
3.3 Zaštita aluvijalnih vodonosnika u Hrvatskoj ... 25
4 MOGUĆNOSTI PRIMJENE GIS-a U HIDROGEOLOGIJI ... 29
4.1 Osnovno o GIS-u ... 29
4.2 Mogućnosti primjene GIS-a u istraživanjima povezanima s vodnim resursima ... 30
4.2.1 Primjena GIS-a kod određivanja moguće raspoloživosti količina podzemnih voda ... 32
4.2.2 Primjena GIS-a kod kanalizacijskih sustava ... 33
4.2.3 Primjena GIS-a kod zaštite od poplava ... 34
4.3 Mogućnost primjene GIS-a u zaštiti aluvijalnih vodonosnika ... 34
4.3.1 GIS kao alat za prikaz zaštitnih zona ... 35
4.3.2 GIS kao alat za implementaciju matematičkog modela u aluvijalnim vodonosnicima ... 36
5 POTREBNE PODLOGE ZA PRIMJENU GIS-a u ZAŠTITI ALUVIJALNIH VODONOSNIKA ... 40
5.1 Zahtjevi GIS-a s obzirom na postojeću primjenu u zaštiti ... 40
5.2 Zahtjevi GIS-a s obzirom na buduću primjenu u zaštiti ... 42
5.2.1 Planiranje GIS projekta ... 42
5.2.2 Potrebne podloge ... 44
6 ZAKLJUČAK ... 49
7 LITERATURA ... 51
POPIS SLIKA ... 58
POPIS TABLICA ... 59

1 UVOD

Nalazimo se na početku 21. stoljeća u kojem će se voditi „ratovi za vodu“, a ne naftu, kao u 20. stoljeću koje se često naziva i „stoljeće nafte“. Budući da bez vode čovjek jednostavno ne može, najbitniji je prirodni resurs kojeg moramo čuvati i zaštititi od onečišćenja. U Republici Hrvatskoj najveći dio vode koju koristimo za ljudsku potrošnju i industriju predstavljaju podzemne vode koje su vezane za vodonosnike – propusne stijene kroz koju se voda kreće s lakoćom u smislu dotoka vode u zdenac za potrebe vodoopskrbe (PUVP, 2016). U hidrogeološkom smislu u sjevernoj Hrvatskoj (Međimurje, Varaždinsko područje, Zagrebačko područje) značajne vodonosne sustave izgrađuju aluvijalni vodonosnici (šljunak i pijesak u dolinama Save, Drave i njihovih pritoka), odnosno stijene primarne poroznosti, dok u južnoj Hrvatskoj značajne vodonosne sustave izgrađuju stijene pretežito pukotinsko - kavernozne poroznosti, odnosno sekundarno porozne stijene.

U ovom radu su opisane značajke aluvijalnih vodonosnika u Republici Hrvatskoj. Uz njihove osnovne značajke, opisane su i metode te mogućnosti zaštite aluvijalnih vodonosnika. Obrađeni su primjeri zaštite nekih aluvijalnih vodonosnika u svijetu i u Republici Hrvatskoj. Kao jedan od alata koji uvelike olakšava i osuvremenjuje postojeće mjere zaštite je Geografski informacijski sustav (GIS). GIS je danas vrlo raširen alat koji pomaže kod donošenja nekih odluka koje su vezane uz prostorne aktivnosti te sudjeluje kod pripreme zaštite podzemnih voda.

Većina aluvijalnih vodonosnika sastoji se od konsolidiranih ili djelomično konsolidiranih šljunka i pijeska (Bear, 1972). Nalaze se u riječnim dolinama, u ravnicama i isprekidanim dolinama. Neki su ograničenog prostiranja, dok se neki aluvijalni vodonosnici mogu protezati na velikim površinama. Njihova debljina također može varirati od nekoliko metara do nekoliko stotina metara. Pješčenjaci i konglomerati su konsolidirani ekvivalent pijeska i šljunka. U ovim stijenama pojedine čestice su cementirane zajedno, čime se smanjuje propusnost.

U Republici Hrvatskoj imamo dva velika aluvijalna vodonosnika: dravski i savski. Pripadaju vodnom području rijeke Dunav. Aluvijalni vodonosnici u dravskom i savskom bazenu bogati su vodom i predstavljaju glavni vodoopskrbni resurs sjevernog dijela Hrvatske. Idući prema istoku, aluvijalni vodonosnici i u pridravskoj i u prisavskoj ravnici su poluzatvorenog do zatvorenog tipa, budući da se debljina krovinskih naslaga znatno povećava (PUVP, 2016). Za vodoopskrbu u aluvijalnim vodonosnicima se najčešće koriste bušeni zdenci, a voda se uglavnom eksploatira iz prvog vodonosnika. Ako voda nije zadovoljavajuće kakvoće, tada se eksploatacija vrši iz drugog vodonosnika. Da bi se zaštitili vodoopskrbni objekti i područje bitno za napajanje tih objekata na temelju Zakona o vodama (NN 153/09, 63/11, 130/11, 56/13, 14/14), izrađen je i Pravilnik o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta (NN 66/11, NN 47/13).

2 OSNOVNE ZNAČAJKE ALUVIJALNIH VODONOSNIKA

Aluvijalni vodonosnici u Republici Hrvatskoj su u okviru inicijalne karakterizacije vodonosnika (Brkić i sur., 2005) razvrstani u kategorije primarnih, sekundarnih i neproduktivnih vodonosnika.

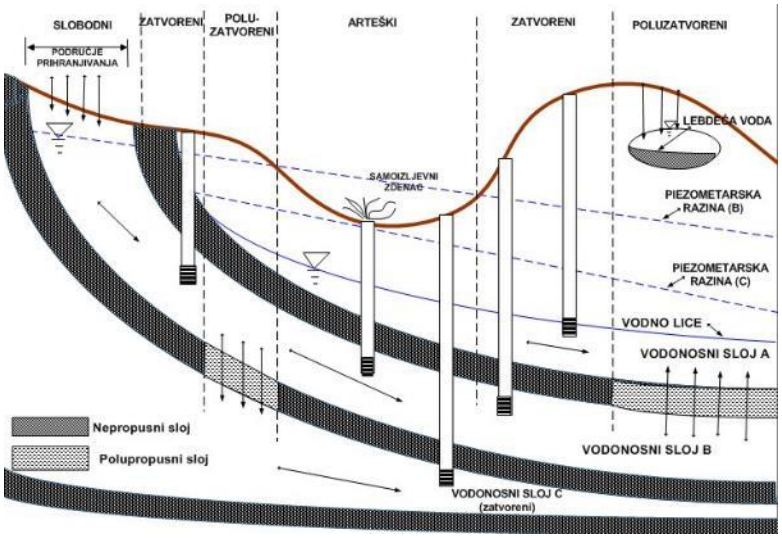
U primarne (osnovne) vodonosnike se ubrajaju:

- kvartarni vodonosnici međuzrnske poroznosti u dolinama rijeka Drave i Save visokih hidrauličkih svojstava iz kojih se odvija glavnina javne vodoopskrbe u sjevernoj Hrvatskoj ili su planirani za vodoopskrbu (dravski vodonosnik, vodonosnik na zagrebačkom području, konusni nanosi desnih pritoka rijeke Save, aluvijalni vodonosnik na karlovačkom području)
- karbonatni vodonosnici pukotinsko-kavernozne poroznosti i visoke propusnosti u zonama visokog krša u slivovima rijeka Kupe i Une, iz kojih podzemna voda istječe na izvorima velikih izdašnosti

U sekundarne vodonosnike se ubrajaju:

- kvartarni vodonosnici međuzrnske poroznosti u slivovima rijeka Drave i Save nešto nižih hidrauličkih svojstava koji se koriste za vodoopskrbu, a izdašnosti izvorišta su u pravilu manja od 20 l/s
- karbonatni (trijaski) vodonosnici pukotinske poroznosti i osrednje propusnosti u području sjeverne Hrvatske (Zagorsko i Slavonsko gorje, Žumberačko-Samoborsko gorje, Medvednica)
- karbonatni vodonosnici pukotinsko-kavernozne poroznosti u zonama plitkog krša u slivovima rijeke Kupe, praktički bez značajnijih izvora

Aluvijalni vodonosnici, s obzirom na krške vodonosnike, imaju veću mogućnost „samopročišćavanja“ jer se voda procjeđuje kroz različite vrste propusnih i nepropusnih naslaga. Slabopropusni sloj je sloj ili stijena iz koje se voda ne može crpiti pomoću zdenaca. Slabopropusnim naslagama u sjevernoj Hrvatskoj se smatraju npr. glinovito-prašinaste naslage koje se nalaze u krovini i podini vodonosnika. Kroz njih se voda može procjeđivati iz jednog vodonosnog sloja u drugi. Nepropusni sloj ili stijena ne propušta zamjetnu količinu vode (Bačani, 2006). Također je vrlo bitno je li aluvijalni vodonosnik otvoren, polouzatvoren ili zatvoren (slika 1).



Slika 1. Tipovi vodonosnih slojeva (Bear, 1972)

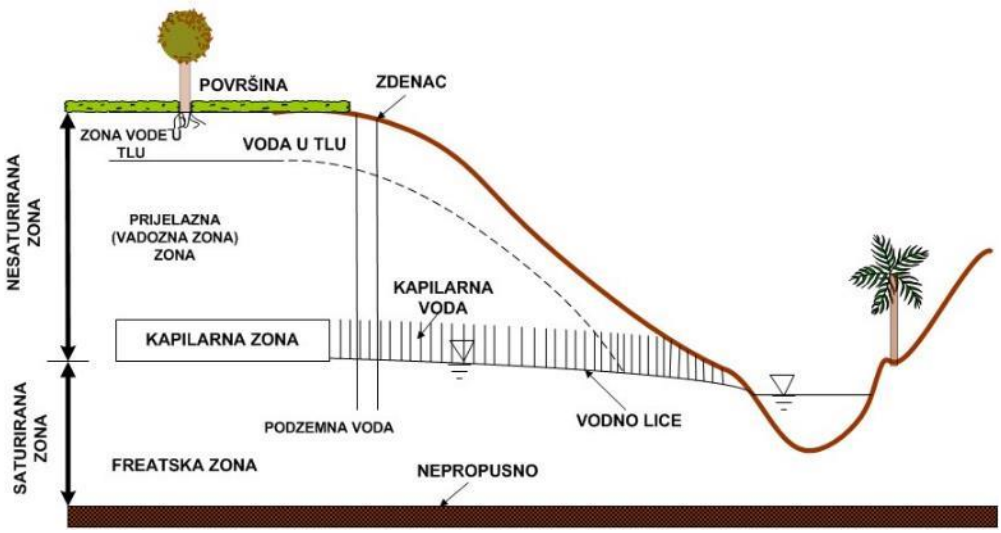
Zatvoreni vodonosni sloj je potpuno saturirani vodonosni sloj čiju gornju i donju granicu čine nepropusne naslage tj. njihova hidraulička vodljivost je K'=0. U zatvorenim vodonosnim slojevima tlak vode je veći od atmosferskog tako da je piezometarska razina od vodnog lica. Voda se u zatvorenom vodonosniku može zadržavati duži vremenski period (godinama, desetljećima). U uobičajenim prirodnim uvjetima je manje podložan izravnom antropogenom utjecaju s površine terena.

Poluzatvoreni vodonosni sloj je potpuno saturirani vodonosni sloj kojemu se u krovini (i podini) nalaze slabopropusne naslage, čija hidraulička vodljivost je veća od nule, ali puno manja od hidrauličke vodljivosti vodonosnog sloja pa se horizontalna komponenta toka može zanemariti. Voda je pod tlakom većim od atmosferskog.

Otvoreni ili slobodni vodonosni sloj je propusni sloj samo djelomično ispunjen vodom, leži na nepropusnoj podlozi. Gornja granica saturiranog dijela je vodno lice pod atmosferskim tlakom. Razina vode u piezometru uglavnom se podudara s vodnim licem. Za slobodne vodonosne slojeve izgrađene od sitnih čestica, npr. od sitnozrnih pijesaka karakteristično je tzv. zakašnjelo otpuštanje, tj. drenaža pora gravitacijom se dešava s određenim vremenskim zakašnjenjem (Bačani, 2006). Otvoreni vodonosnik je podložniji vanjskom utjecaju i izmjeni kišnih i sušnih razdoblja, a time je i osjetljiviji na utjecaj onečišćenja.

Na svom kružnom putu u prirodi voda se jednim dijelom infiltrira u podzemlje. Voda čije je porijeklo pretežito površinska voda naziva se vadozna, odnosno freatska voda. Osim ove vode, u podzemlje se može nakupiti voda nastala kondenzacijom vodenih para iz unutrašnjosti Zemlje. Takvu vodu nazivamo juvenilna voda. Voda koja se zadržava u stijeni iz vremena nastanka nazivamo konatnom vodom. Praktično značenje u hidrogeologiji ima samo vadozna, odnosno freatska voda, koja se nalazi u površinskim dijelovima litosfere.

Kada se voda jednom infiltrira u podzemlje ona se uglavnom dalje giba, a s obzirom na silu koja uzrokuje to gibanje razlikujemo pelikularni, kapilarni i gravitacijski tok podzemne vode (slika 2).



Slika 2. Raspodjela vode u podzemlju (Bear, 1972)

Pelikularni tok je uzrokovan molekularnim silama privlačenje između čestica tla i vode i to je zapravo širenje vlažnog omotača ili filma oko suhih čestica stijena ili tla. Kada vlažni film naraste izvan dosega djelovanja molekularnih sila voda se nastavlja dalje gravitacijski procjeđivati. Takav tok je prisutan u prijelaznoj zoni.

Kapilarni tok je uzrokovan molekularnim silama privlačenja čestica tla i vode i površinskom napetosti fluida. Odvija se u kapilarnoj zoni koja se nalazi iznad vodnog lica i to uvijek iz saturirane zone prema nesaturiranoj.

Gravitacijski tok je tok s kojim se praktična hidrogeologija bavi. Odvija se uslijed hidrauličkog gradijenta. Gravitacijski tok može biti laminaran i turbulentan. Laminaran

je uvjetovan malim brzinama i on je karakterističan za tok vode u primarno poroznim stijenama i sekundarno poroznim, tj. raspucalim stijenama gdje pukotine nisu velikih dimenzija. Turbulentni tok ima puno veću brzinu i karakterističan je za otvorene površinske tokove ili za stijene s pukotinskom poroznošću gdje su dimenzije pukotina, tj. kaverne velike (Bačani, 2006).

3 ZAŠTITA ALUVIJALNIH VODONOSNIKA

Zaštita podzemnih voda predstavlja značajan posao koji utječe na sve ljude direktno ili indirektno. Zbog toga je vrlo važno imati dobro razvijenu strategiju te uključiti stručnjake i zajednicu u donošenje odluka. Za izradu bilo kojeg dokumenta koji doprinosi zaštiti podzemnih voda, potrebno je izabrati kompetentne ljude koji će provoditi taj projekt. Bitno je surađivati s lokalnim stanovništvom te slušati i ukoliko je moguće, uvažiti njihove zahtjeve. Nakon što je odabran tim ljudi koji provode zaštitu podzemnih voda, treba se utvrditi koji su ciljevi i mogućnosti zaštite na tom području. Koje područje obuhvaća i u kojoj mjeri se treba štititi podzemna voda (EPA US, 2016). Kada se odluči koje područje se štiti, potrebno je odrediti metode i matematičke modele kojima će se utvrđivati granice zona između pojedinih slivova ili podslivova. Za razliku od krških vodonosnika, za aluvijalne možemo koristiti određene metode i matematičke izračune, jer se podzemna voda kreće kroz poroznu sredinu te otprilike znamo koje su brzine podzemne vode kroz određeni materijal. Kod krških vodonosnika takve modele je teže izvesti zbog anizotropije i heterogenosti krških sustava, tj. zbog neravnomjernog rasprostiranja velikih pukotinskih sustava u stijenama.

U Republici Hrvatskoj je prvi korak kod zaštite aluvijalnih vodonosnika provedba vodoistražnih radova. Uobičajeno se razlikuju dvije faze istraživanja (Pravilnik o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta, NN 66/11, 47/13):

- **1. faza**: prikupljanje i reinterpretacija (analiza) svih već provedenih vodoistražnih radova
- **2. faza**: dodatni vodoistražni radovi koji se provode nakon analize postojećih podataka

Potrebni vodoistražni radovi aluvijalnih vodonosnika mogu se podijeliti u 3 skupine istraživanja (Meaški, 2016):

1. **skupina istraživanja** obuhvaća istraživanja usmjerena na određivanje hidrogeoloških odnosa vodonosnog sustava, odnosno bazna istraživanja usmjerena na prirodni opis vodonosnika i izradu matematičkog modela vodonosnika. To podrazumijeva određivanje litološkog sastava vodonosnika, prostornog rasporeda vodonosnih slojeva i njihovog odnos prema krovinskim i podinskim naslagama,

određivanje rubnih uvjeta vodonosnika te osnovnih hidrogeoloških parametri (hidraulička vodljivost, transmisivnost, koeficijent uskladištenja, efektivna poroznost, hidraulički otpor, koeficijent procjeđivanja, koeficijent dreniranja, specifično otpuštanje, smjer i brzina tečenja podzemne vode i dr.).

2. **skupina istraživanja** je usmjerena na određivanje kvalitete podzemne vode te koncentracije onečišćenja u vodi. Radi se o podacima vezanim za kvalitetu podzemne vode koje je neophodno znati prije određivanja zaštitnih mjera kako bi se mogla napraviti usporedba i istražiti trendovi nakon što se uspostave zone sanitarne zaštite.
3. **skupina istraživanja** je usmjerena na istraživanje purifikacijskih svojstava vodonosnika, kvantificiranje koeficijenata disperzije, koeficijenti distribucije i dr. Radi se o istraživanjima koja se uobičajeno provode kada je već došlo do onečišćenja vodonosnika te je u svrhu remedijacijskih mjera potrebno istražiti transport onečišćenja kroz saturirani dio vodonosnika.

Da bi se u različitim zemljama usuglasili mnogi različiti zakoni vezani za zaštitu podzemnih voda, pogotovo u zemljama članicama Europske unije, donesene su direktive i strategije kojima bi se trebalo osigurati podjednako stanje i zaštita podzemnih voda. U njima se nalaze smjernice te obveze pojedine zemlje u svrhu očuvanja postojećeg stanja ukoliko je dobro te poboljšanja ukoliko je stanje podzemnih a i površinskih voda loše.

Neke od europskih direktiva povezanih s vodama i njihovom zaštitom su:

- Water Framework Directive (Okvirna direktiva o vodama, ODV) (2000/60/EC)
- Groundwater Directive (Direktiva o podzemnim vodama, DPV) (2006/118/EC)
- Drinking Water Directive (80/778/EEC) s izmjenama i dopunama Directive (98/83/EC)
- Major Accidents (Seveso) Directive (96/82/EC)
- Environmental Impact Assessment Directive (85/337/EEC)
- Sewage Sludge Directive (86/278/EEC)
- Urban Waste-water Treatment Directive (91/271/EEC)
- Nitrates Directive (91/676/EEC)
- Habitats Directive (92/43/EEC)
- Integrated Pollution Prevention Control Directive (96/61/EC)
- Bathing Water Directive (2006/7/EC)

- Floods Directive (2007/56/EC)
- Marine Strategy Framework Directive (2008/56/EC).

Direktiva 2000/60/EC Europskog Parlamenta i Vijeća kojom se uspostavlja okvir za djelovanje Europske Zajednice na području politike voda, ukratko Okvirna Direktiva o vodama EU-a (ili još kraće ODV) usvojena je 23. listopada 2000. godine. Okvirna Direktiva o vodama je najznačajniji dio EU legislative o vodi do današnjeg dana, a osmišljena je da poboljša i integrira način na koji se upravlja vodnim tijelima diljem Europe. Direktiva pokriva istovremeno i površinske i podzemne vode, pri čemu površinske vode uključuju rijeke i jezera (kopnene vode) kao i obalne i prijelazne vode (npr. estuariji).

ODV se temelji na 5 ključnih načela:

- **cjelovitost:** cijeli vodeni sustav je uzet u obzir na koordiniran način, sinergije su identificirane, a dupliciranje izbjegnuto. Vodni sustav uključuje podzemnu vodu, površinsku vodu i morsku vodu
- **integrirani pristup**: povezuje se s drugim sektorima, kao što su agronomija i prostorno uređenje
- **transparentnost**: sudjelovanje javnosti i savjetovanje je središnji predmet
- **ekonomski pristup**: ekonomičnost mjera i učinkovita uporaba vode kroz odgovarajuće politike cijene su ključna pitanja
- **ekološki pristup**: sveukupni cilj je postići dobru kvalitetu vodenog tijela. To uključuje dobar ekološki status koji je ocijenjen kroz opsežan biološki monitoring (Dimas, 2007)

3.1 Osnovne pretpostavke učinkovite zaštite

Za učinkovitu zaštitu podzemnih voda vrlo je bitno odrediti znanstvenu metodu koja će nam odrediti položaj i kretanje te razumijevanje toka podzemnih voda. Znanstvena metoda može se definirati kao načela i postupci za sustavno i objektivno traženje znanja koje uključuje: prepoznavanje i formuliranje problema, prikupljanje podataka kroz promatranje i eksperiment, te formulaciju i testiranje hipoteza. Znanstvena metoda stoga zahtijeva objektivnu uporabu činjenice bez narušavanja subjektivnih osjećaja ili predrasuda. Procjena ranjivosti podzemnih voda je ona koja slijedi znanstvenu metodu i

obuhvaća adekvatnu dokumentaciju podataka, promatranja i metoda istraživanja (Focazio i sur., 2002).

Razumijevanje hidrološkog sustava te hidrogeoloških i geokemijskih procesa je jedno od osnovnih pretpostavki za učinkovitu zaštitu. Hidrogeološka karta daje vrijedne podatke kod planiranja i izvedbe vodoopskrbnih zahvata, za potrebe zaštite i razmatranja problema onečišćenja podzemnih voda, hidroenergetskih radova, te kod prostornog planiranja. Hidrogeološka karta pokazuje prirodne karakteristike nekog područja što znači da može ukazati na prirodnu ranjivosti neke sredine. Definira odnos podzemnih voda, pojavljivanje i obnavljanje, što izravno utječe na korištenje i zaštitu podzemnih voda. Bitno je napraviti najprije mnoga istraživanja da bi se odvojile određene cjeline podzemnih voda prema ODV. Cjelina podzemne vode označava određen volumen podzemnih voda u vodonosniku ili vodonosnicima. Za detaljnije izdvajanje cjelina podzemnih voda potrebni su dodatni istražni radovi (hidrološke analize, hidrogeokemijska istraživanja, i dr.). Okvirna direktiva o vodama predviđa izdvajanje svih cjelina podzemne vode iz kojih se može crpiti više od 10 m^3/dan. Nakon toga se najčešće rade analize prirodne ranjivosti vodonosnika. Za te analize bitni su podaci o debljinama i litološkom sastavu krovinskih naslaga koje imaju osnovnu ulogu u prirodnoj zaštiti vodonosnika. Najčešće se krovinske naslage deblje od 20 m smatraju povoljne za zaštitu vodonosnika. Krovinske naslage od 5 do 20 m su srednje povoljne za zaštitu vodonosnika, dok one manje debljine utječu značajno na prirodnu zaštitu vodonosnika. Za određivanje prirodne ranjivosti bitni su i neki drugi slojevi, kao npr. (nagib terena, količina oborina, i dr.). Nakon definiranja prirodne ranjivosti vodonosnika određuje se analiza kakvoće podzemne vode, za sve cjeline podzemne vode, a analiza ranjivosti se koristi kao jedan od elemenata za procjenu pritisaka i utjecaja (IMPRESS analiza). Također je bitno odrediti povezanost površinske i podzemne vode.

Kretanje podzemne vode je vrlo bitno za lakše i točnije određivanje područja prihranjivanja te vrijeme zadržavanja podzemne vode. Gotovo svaka informacija o sustavu podzemne vode će poboljšati sposobnost da se utvrdi osjetljivost sustava podzemnih voda na onečišćenje. Međutim, od posebne važnosti su one informacije koje se izravno odnose na kretanje vode kroz vodonosnik. Najčešće se ovakve informacije dobivaju bušenjem zdenaca u kojima se određuju hidraulički parametri. Potrebno je poznavanje brzine i količine podzemne vode da bi se mogao odrediti utjecaj i smjer

ukoliko dođe do onečišćenja. Zbog toga je bitno odrediti jedan od numeričkih modela koji opisuje stanje u podzemlju te pronos pojedinih čestica u fluidu. Numeričko modeliranje se koristi sve češće za istraživanje ponašanja otopljenih tvari koje se kreću u heterogenom poroznom mediju. Modeliranje je moguće u stijenama međuzrnske poroznosti, dok su kod stijena pukotinske poroznosti ovakvi modeli puno teže izvedivi zbog specifičnosti takvih stijena.

Određivanje područja zaštite i razina zaštite je rezultat svih prijašnjih istraživanja. Na temelju hidrogeološke karte i brzina podzemnih tokova dobivenih matematičkim modelima, određuje se područje koje će biti pod zaštitom. Bitno je štititi područja koja služe za vodoopskrbu, odnosno neposrednu blizinu zdenaca te područje prihranjivanja. Uzimanjem u obzir svih tih pretpostavki radi se karta koja obuhvaća područja zaštite. U tome uvelike pomaže GIS koji sve te podatke sažima i pretvara u vizualno pregledne karte, koje su bitne za lakše prostorno snalaženje i kao podloga za daljnje korake. Kod određivanja područja zaštite i razine zaštite koja se primjenjuje vrlo je bitno surađivati s ostalim strukama, ali najbitnije je istaknuti zaštitu podzemnih voda kao primarni cilj. Kod izrade zakona i propisa koji štite podzemne vode i izvorišta važna je i suradnja s lokalnim stanovništvom. Potrebno je omogućiti gospodarski razvoj neke regije, ali uz osiguravanje dovoljnih količina kvalitetne pitke vode. Svako onečišćenje pitke vode uvelike povećava cijenu te vode, posebice ukoliko je potrebno raditi pred tretman ili u najgorem slučaju remedijaciju vode koja je vrlo skupa. Zbog toga je poželjnije djelovati preventivno i zaštititi podzemne vode, nego kasnije skupim postupcima vraćati ju u prvobitno stanje.

3.2 Primjeri zaštite aluvijalnih vodonosnika u svijetu

3.2.1 Nizozemska

Približno 60 % vode za piće u Nizozemskoj eksploatira se iz podzemnih voda, a preostalih 40 % dobiveno je iz površinskih voda (Wuijts, 2013). Upotreba pitke vode iz svih izvora uglavnom se povećala u razdoblju od 1950. do 1990. godine sa 300 na 1.200 milijuna m^3/god (Vewin, 2010). Ovakva eksploatacija i uporaba vode stabilizirana je nakon 1990. godine. Tvrtke koje imaju koncesiju za eksploataciju vode upravljaju s oko 200 zdenaca kapaciteta od 0,5 do 10 milijuna m^3/godina. Općenito, podzemna voda nema patogenih

mikroorganizama i zaštićena je krovinskim naslagama od izravnih utjecaja ljudskih aktivnosti. Međutim, ova prirodna zaštita nedovoljna je za očuvanje buduće kakvoće vode na mnogim zdencima. Zbog toga je važnost pridodana zakonima i propisima koji dodatno štite podzemne vode. U osamdesetima, nacionalna vlada pokrenula je politiku zaštite podzemnih voda, posebno za područja podzemnih voda za pitku vodu i općenito održivo korištenje zemljišta. Rezultat tih odluka je da u praksi zakonodavstvo ne pruža dovoljnu zaštitu podzemnih voda za ljudsku potrošnju. Nakon 2000. godine uvedena je Europska direktiva o vodama da bi se na državnoj i regionalnoj razini poboljšala zaštita podzemnih voda i u praksi (Brink i Wuijts, 2016).

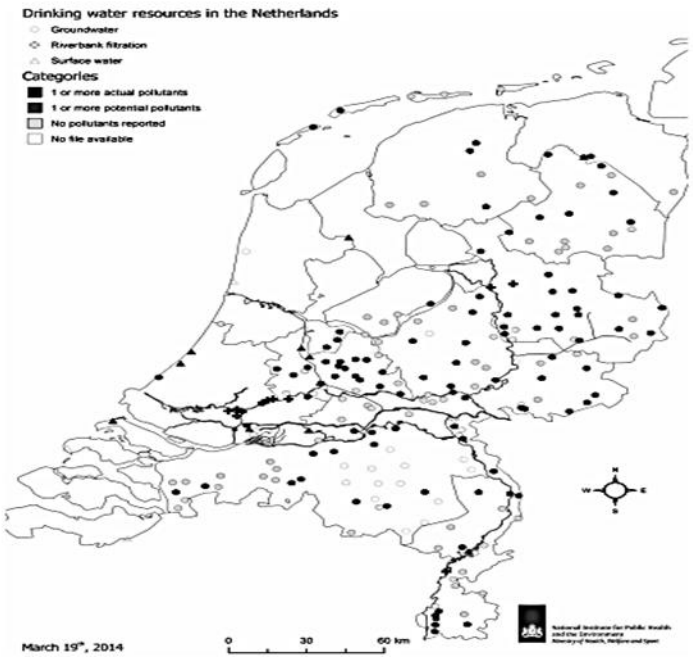
Vodonosnici u Nizozemskoj su uglavnom izgrađeni od nekonsolidiranih kvartarnih sedimenata (Dufour, 2000), koji u velikim dijelovima Nizozemske dosežu i do nekoliko stotina metara debljine. Zapadni i sjeverni dijelovi zemlje u blizini Sjevernog mora imaju problema sa salinitetom podzemnih voda. U nekim područjima blizu istočne granice, nema vodonosnika koji bi se mogli eksploatirati u većim količinama. Većina iskoristive podzemne vode nalazi se u južnim, središnjim i istočnim područjima s pješčanim vodonosnicima pleistocenske starosti. Međutim, postoje lokalni polupropusni slojevi holocenskog porijekla. Često se glinasti slojevi pojavljuju unutar pleistocenskih pješčanih slojeva, razdjeljujući sustav u dva ili više vodonosnika (Cramer i sur., 2010). Kao posljedica toga, regionalna hidrogeološka situacija je heterogena, što rezultira različitim vremenima kretanja toka podzemnih voda do eksploatacijskih zdenca. Glavni doprinos prihranjivanja u pjeskovitim područjima je infiltracija oborina (Meinardi, 1994).

Nizozemska je vrlo gusto naseljena s intenzivnim korištenjem zemljišta i izraženom urbanizacijom cijelog prostora. Na površini od 38.873 km^2 živi oko 16,4 milijuna stanovnika. Poljoprivreda, industrijske djelatnosti i promet su vrlo razvijeni što je rezultiralo promjenom kakvoće i dostupne količine pitke vode. Velika difuzna onečišćenja javljaju se u poljoprivredi (70 % površine zemljišta) te gradovima (17 % površine zemljišta) dok ostatak prirodnog područja (13 % površine zemljišta) ne utječe na kakvoću pitke vode (Brink i Wuijts, 2016). Rezultat toga je veliki pritisak na podzemne vode te onečišćenja industrijskog, kućanskog i farmaceutskog podrijetla. Statistika je pokazala da više od 50 % najopasnijih područja onečišćenja za podzemne vode dolazi od benzinskih postaja, kemijske industrije i kemijskih praonica (Brink i Wuijts, 2016).

Nacionalne smjernice za određivanje područja za zaštitu podzemnih voda na temelju vremena kretanja podzemnih voda prema zdencima (obično 25 godina) te na temelju rizika od onečišćenja u Nizozemskoj su osmišljene 1980. godine (Dufour, 2000). Od tada se dodatno razvijaju propisi koji pomažu u upravljanju podzemnim vodama. Danas je u Nizozemskoj u svrhu zaštite podzemnih voda oko 5 % ukupne površine zemlje. Međutim, područja izvan tih područja uglavnom nemaju posebnu zaštitu. Provedba ODV-a dovela je do općih ciljeva i vremenski ograničenih obveza za vodna tijela namijenjena ljudskoj potrošnji.

Kako bi se lakše povezao pravni okvir s lokalnom situacijom, stvarne i buduće rizike za kvalitetu podzemnih voda u Nizozemskoj je potrebno istražiti kroz:

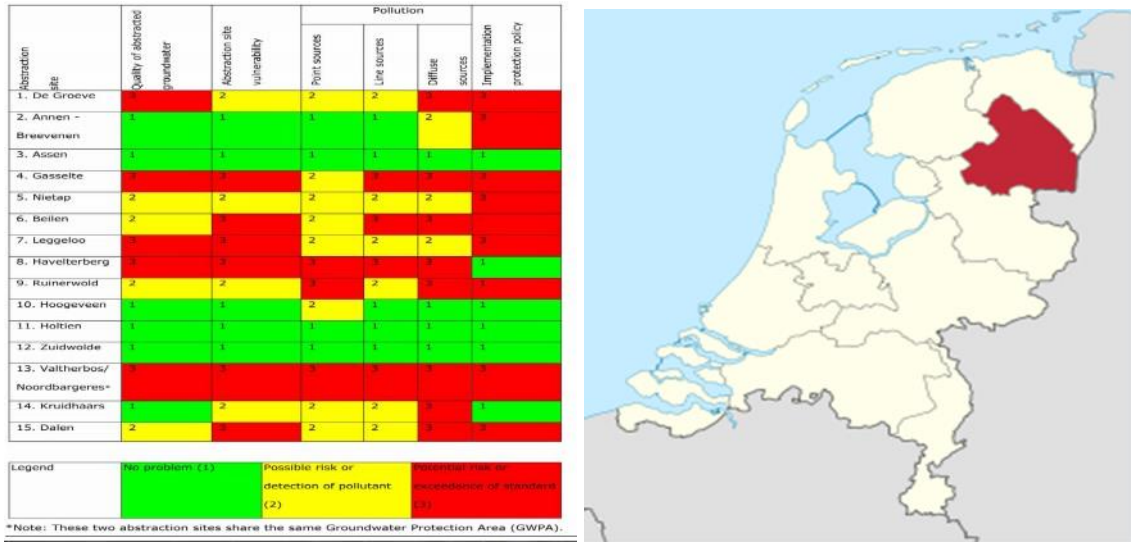
- trenutnu i procijenjenu/očekivanu kakvoća vode
- hidrogeološki sustav u kombinaciji s korištenjem zemljišta (konceptualni model) (EU, 2010), koji je pokazatelj mogućih rizika za kvalitetu podzemnih voda
- provedbu politike zaštite u regionalnim, lokalnim, ekološkim i prostornim planovima; novi rizici za kvalitetu podzemnih voda mogu biti uvedeni neadekvatnim provođenjem politike zaštite



Slika 3. Prisutnost ili odsutnost stvarnih ili mogućih onečišćujućih tvari u površinskim i podzemnim vodama (Laeven, i sur., 1999)

U Nizozemskoj se mora pratiti oko 96 od 206 pregledanih cjelina podzemnih (slika 3). Ova su područja istaknuta kao "prekoračenja standarda", zadržavaju obvezu procjene rizika tekućih aktivnosti unutar zaštitne zone kao osiguranje kvalitetne podzemne vode u budućnosti i provedbu politike zaštite u lokalnom prostornom planiranju.

Nacionalna evaluacija je pokazala da se u dokumentima zaštite na dosljedan način procjenjuju rizici glede kvalitete vode. Osim toga, mogu se identificirati specifični rizici za svaku pojedinu cjelinu podzemnih voda (slika 4).



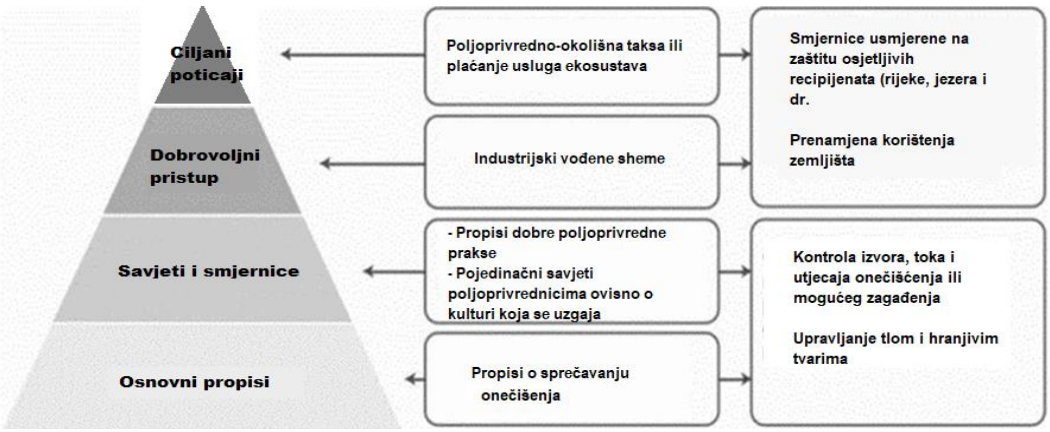
Abstraction site	Quality of abstracted groundwater	Abstraction site vulnerability	Pollution: Point sources	Pollution: Line sources	Pollution: Diffuse sources	Implementation protection policy
1. De Groeve	3	2	2	2	3	3
2. Annen - Breevenen	1	1	1	1	2	3
3. Assen	1	1	1	1	1	1
4. Gasselte	3	3	2	3	3	3
5. Nietap	2	2	2	2	2	3
6. Beilen	2	3	2	3	3	3
7. Leggeloo	3	3	2	2	2	3
8. Havelterberg	3	3	3	3	3	1
9. Ruinerwold	2	2	3	2	3	3
10. Hoogeveen	1	1	2	1	1	1
11. Holtien	1	1	1	1	1	1
12. Zuidwolde	1	1	1	1	1	1
13. Valtherbos/ Noordbargeres*	3	3	3	3	3	3
14. Kruidhaars	1	2	2	2	3	1
15. Dalen	2	3	2	2	3	3

Legend	No problem (1)	Possible risk or detection of pollutant (2)	Potential risk or exceedance of standards (3)

*Note: These two abstraction sites share the same Groundwater Protection Area (GWPA).

Slika 4. Rezultati analize rizika cjelina podzemnih voda u pokrajini Drenthe (Laeven i sur., 1999)

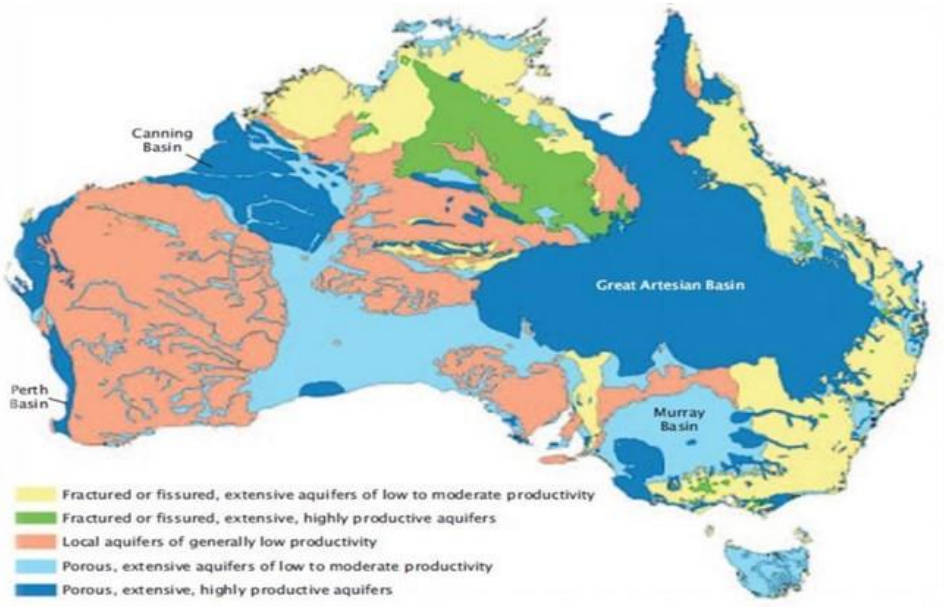
Nacionalna i regionalna politika temelje se na postojećem pravnom okviru zaštite podzemnih voda (slika 5).



Slika 5. Klasifikacija provedbe mjera zaštite podzemnih voda (Focazio i sur., 2002)

3.2.2 Australija

U Australiji podzemne vode su važne jer predstavljaju izvor pitke vode, a dio tih voda se koristi za navodnjavanje. Povećana potražnja i trend sve više razdoblja sušne klime u Australiji, stavlja pritisak na neke izvore podzemnih voda. Zaštita podzemnih voda i kvalitete je imperativ australske vlade kako bi se osigurala zaštita zdravog ekosustava kao i za budući ekonomski te gospodarski rast stanovništva. *National Water Quality Management Strategy* (NWQMS Australia, 2013) je zajednički razvijen od strane države te zajednica tijekom 1990-ih kroz poljoprivredu i zaštitu prirodnih resursa Upravnog vijeća Australije i Novog Zelanda (*Agriculture and Resource Management Council of Australia and New Zealand*). Unutar te organizacije definiran je Nacionalni centar za istraživanje i analiziranje podzemnih voda (*National Centre for Groundwater Research and Training*, NCGRT). Australija je geološki stari kontinent koji ima velike količine podzemnih voda stare desetine tisuća, čak stotine tisuća godina. Veliki arteški bazen (slika 6) u središnjoj Australiji najveći je vodonosnik takve vrste u svijetu koji pokriva 22 % Australije i sadrži vodu stariju više od milijun godina. Obzirom da je Australija najsuši kontinent i površinski vodni resursi su ograničeni, velika važnost se pridodaje podzemnim vodama. Ovaj nacionalno značajan resurs zahtijeva dugoročno planiranje i upravljanje (Sundaram, 2009).



Slika 6. Karta resursa podzemnih voda Australije (Harrington i Cook, 2014)

Smjernice za zaštitu kvalitete podzemnih voda povezuju sve ostale dokumente te uključuju:

- ocjenu kakvoće vode - za svježu i morsku vodu, pitku vodu i praćenje kakvoća vode
- difuzne i točkaste izvore onečišćenja - uključujući upotrebu poljoprivrednog zemljišta, upravljanje gradskim vodama, kanalizacijskim sustavom i upravljanje otpadnim vodama
- recikliranje vode (remedijacija) - za svrhe tehnološke vode, za potrebe pića, za ponovnu upotrebu i upravljanje izdašnošću vodonosnika

Jedan od primarnih puteva za onečišćenje podzemnih voda je infiltracija onečišćenja s površine zemlje, kroz nezasićenu zonu, do vodonosnika ispod. Plitki vodonosnici posebno su osjetljivi na onečišćenje, osobito kada je pridružena upotreba zemljišta koja uključuje opasne aktivnosti. Poroznost i propusnost nezasićenih zona znatno doprinose vremenu putovanja onečišćivala u podzemnoj vodi. Nezasićena zona može biti vrlo važna za razmatranje kod upravljanja kvalitetom podzemne vode.

U Australiji kemijska industrija predstavlja jednu od većih opasnosti na onečišćenje podzemnih voda, npr. kroz izlijevanje ili ispuštanje opasnih kemikalija bez dodatnog pred tretmana pročišćavanja otpadnih voda u recipijent. Također je jedan od velikih problema i salinitet koji se pojavljuje u podzemnim vodama, a što je posljedica okruženosti morem i prekomjernog crpljenja podzemnih voda. Promjena razina podzemnih voda može uzrokovati promjene kakvoće vode te procese poput prodiranja morske vode i mobilizacije kiselosti i metala u sulfidnom tlu ili stijeni.

U Australiji se resursi podzemnih i površinskih voda dodjeljuju pojedincima ili organizacijama putem planova dodjele i davanja koncesija. Upravljanje podzemnim vodama prije svega je odgovornost državnih i teritorijalnih vlada, uz sudjelovanje predstavnika koji upravljaju vodnim tijelima i korisnika voda. Od 1995. godine kada su prvi put objavljene Smjernice za zaštitu podzemnih voda, uloga australske vlade značajno se proširila u pogledu upravljanja vodama i zakonodavstva, regulacije i politike kvalitete vode (Geoscience Australia, 2009). Nacionalna inicijativa za vodu (*National Water Initiative*, NWI) dogovorena je 2006. godine i uključila je Program podizanja nacionalnog vodnog standarda. Kasnije je izrađen Nacionalni plan upravljanja podzemnim vodama,

pomoću kojeg je uloženo u istraživanje radi unapređenja znanja i upravljanja podzemnim vodnim resursima.

Jedan od postupaka upravljanja kakvoćom podzemnih voda je procjena rizika koji identificira gdje je potrebno poduzimanje određene radnje, nakon čega slijedi provedba mjera kako bi se zaštitila kvaliteta podzemnih voda. NWQMS dosljedno primjenjuje pristup upravljanju podzemnim vodama temeljem procjene rizika. Upravljanje rizikom koristi se u vodoopskrbi kako bi se odredile radnje potrebne za zaštitu kvalitete vode, ovisno o vjerojatnosti i posljedicama opasnosti. Učinkovito upravljanje rizikom omogućit će zaštitu podzemnih voda, kao i minimiziranje troškova.
Standardni pristupi temeljeni na rizicima uključuju identifikaciju opasnosti i procjenu rizika za tu opasnost. Što se tiče kontaminacije podzemnih voda, rizik je uglavnom kvalitativna mjera koja uzima u obzir vjerojatnost pojave opasnosti i posljedice u slučaju nastanka opasnosti. Zahtjev za preventivnim ili upravnim mjerama treba procijeniti pomoću dvije razine rizika:

- maksimalni rizik – rizik u nedostatku preventivnih mjera ili mjera upravljanja
- preostali rizik – rizik nakon primjene preventivnih mjera i upravljanja

Upravljanje, temeljeno na rizicima za zaštitu kvalitete podzemnih voda, može se primijeniti na bilo koji sustav podzemne vode bez obzira na veličinu, ranjivost ili relativnu važnost. U tom kontekstu, sustav podzemnih voda za koji je razvijen plan zaštite može se odnositi na:

- cijeli vodonosnik
- postojeća cjelina podzemnih voda
- područje planova vodnih resursa
- područje koje obuhvaća specifičnu podzemnu vodu ili korištenje zemljišta
- sliv

Potrebno je izraditi konceptualni model sustava podzemnih voda kako bi se postiglo zajedničko razumijevanje sustava koji se štiti. To osigurava konceptualno razumijevanje, koje omogućuje identifikaciju ekološke vrijednosti za podzemne vode i opasnosti te rizike za kvalitetu podzemnih voda. U procjenu bi trebalo biti uključeno odgovarajuće kvalificirano i iskusno osoblje, uz sudjelovanje istraživača i drugih agencija s

poznavanjem određenog područja. Konceptualni model i numeričko modeliranje treba se temeljiti na najboljim dostupnim informacijama.

Primjer korištenja zona za zaštitu kvalitete podzemnih voda

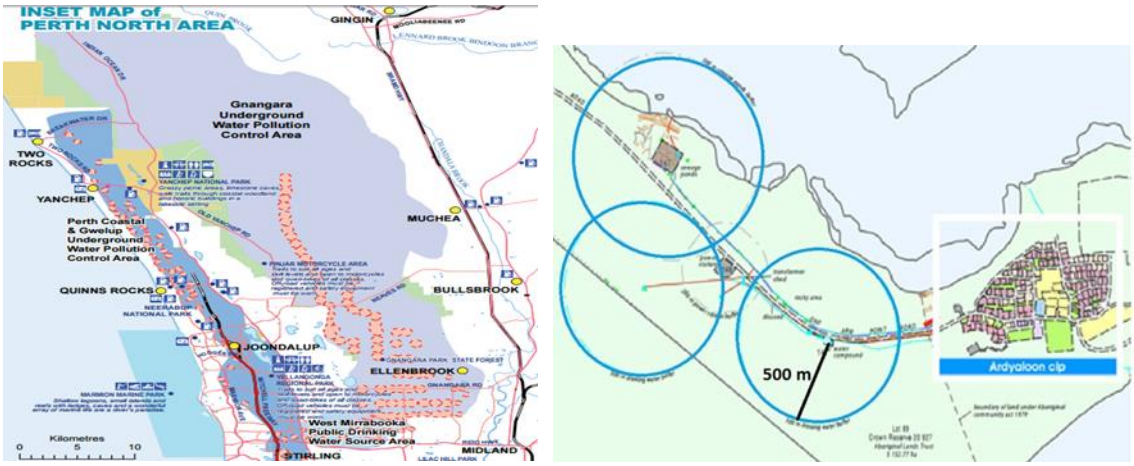
U zapadnoj Australiji rizici onečišćenja u područjima važnim za eksploataciju pitke vode se smanjuju integriranim planiranjem korištenja zemljišta i programom zaštite.

Prvi korak u zaštiti kakvoće vode je da područje koje se eksploatira, definira svoju granicu i integrira pod državnim zakonodavstvom. To osigurava da se lokacija može javno identificirati i biti prepoznata u dokumentima za planiranje korištenja zemljišta. Također se definira područje unutar kojega pod zakonski akti mogu biti primijenjeni radi zaštite kvalitete vode i javnog zdravlja.

Drugi korak je definiranje prioritetnih područja (P1, P2 i P3) zemljišta unutar lokacija za eksploataciju pitke vode:

- prioritet 1 - (P1) područja (npr. državna šuma); Izbjegavanje rizika – sprečavanje razvoja potencijalno štetnih aktivnosti
- prioritet 2 - (P2) područja (npr. ruralna područja); Minimiziranje rizika - nema povećanog rizika od onečišćenja vode
- prioritet 3 - (P3) područja (npr. urbana ili lagana industrijska / komercijalna područja); upravljanje rizicima, za veće rizike onečišćenja podzemne vode, posljedice intenzivnog korištenja zemljišta

Treći korak je definiranje zaštitnih zona unutar vodoopskrbnog područja gdje je najveći rizik onečišćenja te gdje je najveći utjecaj neprikladnog korištenja zemljišta. Zone se definiraju oko područja zdenaca za pitku vodu. Specifično u tim zonama se mogu primjenjivati zakonski akti kao što su ograničenja skladištenja kemikalija. Zaštitne zone su definirane u neposrednoj blizini točaka za eksploataciju pitke vode, jer su ta područja najranjivija od onečišćenja. Zaštitne zone mogu se nalaziti unutar područja P1, P2 ili P3 (slika 7).



Slika 7. Područje zaštite podzemnih voda i zdenaca (lijevo) i primjer zaštitnog područja P3 (desno) (Department of Water and Environmental Regulation, Government of Western Australia, 2016)

Postoje dvije vrste zaštitnih zona:

- *Wellhead Protection Zones* (WHPZ) – zone zaštite definirane za izvore podzemnih voda
- *Reservoir Protection Zones* (RPZ) – zone zaštite definirane za površinske izvore vode

WHPZ su obično kružni s radijusom od 500 m oko svake bušotine namijenjene za eksploataciju pitke vode u P3 područjima i radijusu od 300 m oko svake bušotine u P2 i P1 područjima (osim ako nisu dostupne hidrogeološke informacije za odabir različitih veličina i oblika, slika 7).

Baza podataka o korištenju zemljišta glavno je sredstvo pružanja zaštite podzemnih voda. Jedna od mjera koje se može koristiti jest kontrola zemljišnog područja, gdje su opasni uvjeti (npr. pesticidi i umjetna gnojiva), ograničeni kako bi zaštitili temeljnu kakvoću podzemnih voda. Izvor podzemne vode velike važnosti, kao što je opskrba pitkom vodom može zahtijevati stroga ograničenja korištenja zemljišta, dok za potrebnu manju kakvoću podzemnih voda (manje osjetljivim kategorijama okolišnih vrijednosti) može biti manje ograničenja na korištenje zemljišta. Većinom racionalnim korištenjem zemljišta može se smanjiti rizik od onečišćenja, iako je posebno teško zaštititi potrebne vodonosnike u urbanim sredinama.

Planovi zaštite zdenaca nastoje spriječiti onečišćenje u blizini zdenaca za eksploataciju podzemnih voda i općenito se primjenjuju na javne bušotine. Planovi zaštite zdenaca štite

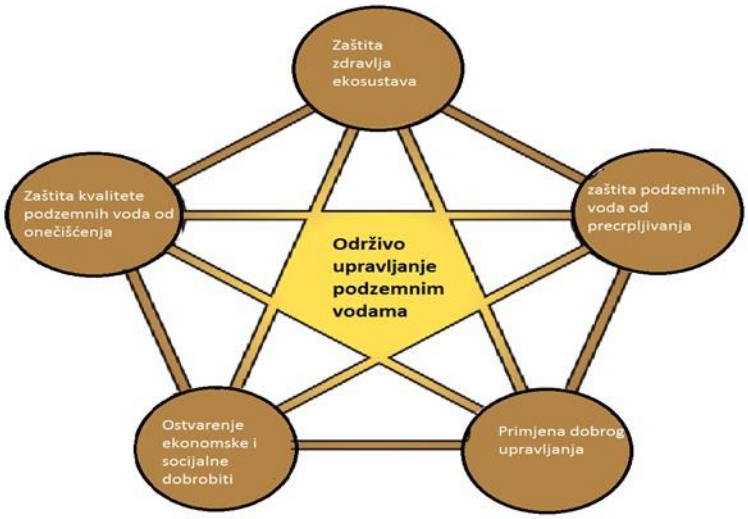
od propuštanja površinskih onečišćenja u podzemnu vodu kroz bušotine. Koncept održavanja cjelovitosti bušenja za zaštitu podzemnih voda odnosi se i na bušotine bez podzemnih voda kao što su bušotine za vađenje plina za ugljen, bušotine za naftu, bušotine za monitoring. Praćenje usklađenosti je važno kako bi se osiguralo održavanje standarda. Plan zaštite zdenaca uključuje (NWQMS Australia, 2013):

- specifikaciju sveobuhvatnih standarda izrade bušotina
- zahtjev za izvješća o dovršetku bušotine
- održavanje rasporeda održavanja i praćenje rezultata bušenja
- operativna ograničenja na crpljenje (kao što su određeno vrijeme i volumeni, te ograničenja za dubinu crpljenja)
- izrada zaštitnih zona oko bušotine, treba uzeti u obzir veličinu i učinke disperzije i difuzije na distribuciju onečišćenja
- sigurno skladištenje opasnih tvari
- ograničenja pristupa u okviru zone zaštićene bušotine
- širi zahtjevi mreže praćenja, uključujući rano upozoravanje na onečišćenje
- plan odgovora na onečišćenje

3.2.3 Kanada

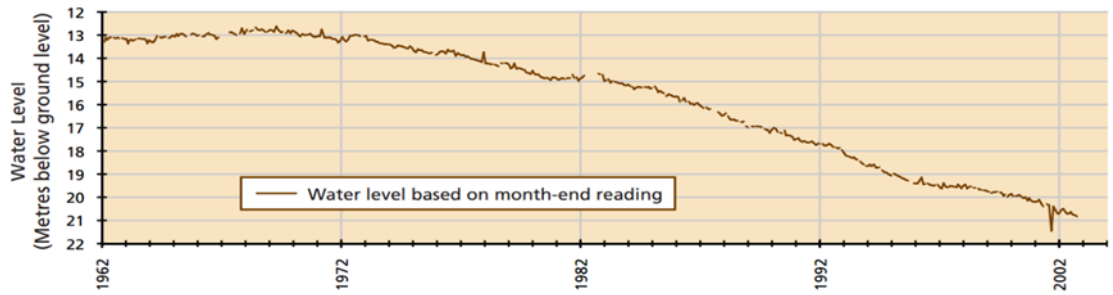
Kanada sa svojom industrijom koristi dvostruko veće količine vode od europskog prosjeka. Samo Sjedinjenje Američke Države su ispred Kanade što se tiče potrošnje vode (OECD, 1999). Podzemne vode ključna su komponenta ove ukupne potrošnje. Gotovo 30 % kanadskog stanovništva (gotovo 10 milijuna Kanađana) ovisno je o podzemnim vodama, i više od 80 % ruralnog stanovništva zemlje se oslanja na podzemne vode kao glavni izvor vodoopskrbe (Environment Canada, 2004; Nowlan, 2005).

Zbog onečišćenja i pretjerane upotrebe pitke vode pažnja je skrenuta na zaštitu podzemnih voda. Problemi kvalitete i količine podzemnih voda izazivaju ogromne troškove za društvo. Zbog toga je vrlo bitno održivo upravljanje podzemnim vodama (slika 8). Predviđa se rast populacije između 36 i 42 milijuna ljudi do 2031. i između 36 i 50 milijuna do 2056. godine (Statistics Canada, 2005). Također se predviđa i povećanje koncentracije stanovništva u urbanim područjima od 80 % te povećana potražnja za pitkom vodom.



Slika 8. Pentagon za održivo upravljanje podzemnim vodama (Council of Canadian Academies, 2009)

Kao primjer ubrzane urbanizacije je grad Langley u blizini Vancouvera koji je 2008. imao 100.000 stanovnika, a predviđa se da će do 2023. imati 165.000 stanovnika. Posljedica brzog rasta je i povećana potrošnja podzemne vode. Kontinuirano praćenje u razdoblju od 40 godina, pokazalo je pad razine vode u intenzivnije korištenim vodonosnicima (slika 9). Analiza podataka ukazuje da padovi nisu zbog promjena u količini padalina, nego su posljedica pretjeranog korištenja podzemnih voda (Township of Langley, 2008).



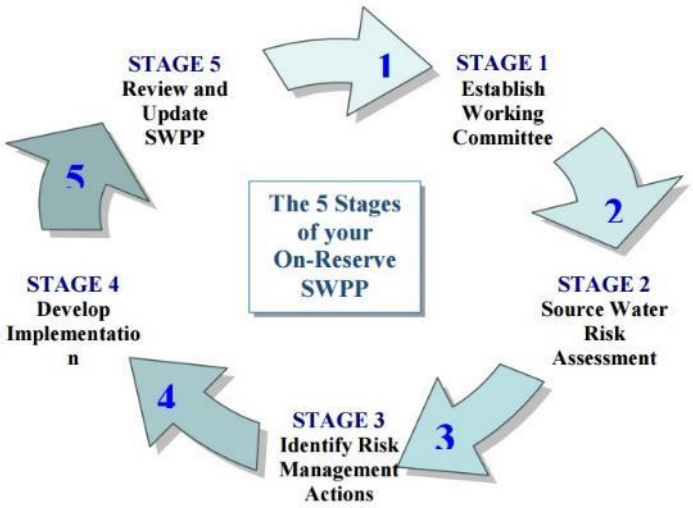
Slika 9. Hidrogram pokazuje razinu vode u zdencu br.7 za vodoopskrbu grada Langley (British Columbia Ministry of Environment, 2008)

Plan zaštite vodnih resursa (*Source Water Protection Plan*, SWPP) je dokument kojim se nastoji zaštititi kakvoću i količinu pitke vode. SWPP je sustavna i organizirana procjena izvora onečišćenja i načina pronosa onečišćenja poveznih s ljudskom aktivnošću i prirodnim procesima koji se pojavljuju u slivnom području, te na taj način identificira i

poduzima radnje upravljanja kako bi se ublažilo ili smanjilo rizike onečišćenja vode na prihvatljivu razinu.

SWPP ima pet faza (slika 10) kojima smanjuju rizike od onečišćenja izvora:

- uspostava radnog odbora SWPP-a
- procjena rizika na izvorima (zdencima)
  - sadrži nekoliko važnih podfaza te predstavlja najduži i najzahtjevniji dio izrade plana: određivanje izvora i sustava pitke vode, opis sustava pitke vode, popis potencijalnih izvora onečišćenja, procjena rizika onečišćenja izvora, prioritizacija rizika onečišćenja
- identifikacija potencijalnih rizika za podzemne vode
- izrada Strategije provedbe
- pregled i ažuriranje SWPP otprilike svakih 5 godina



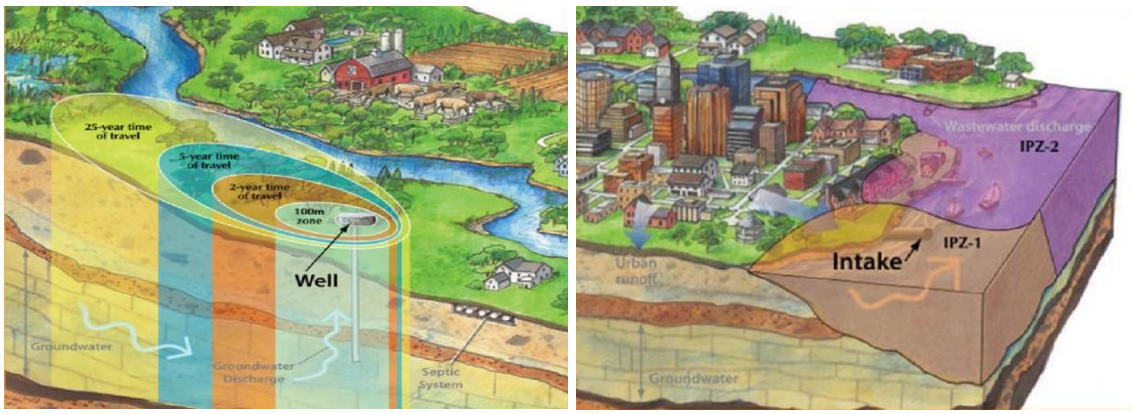
Slika 10. Proces plana zaštite voda u Kanadi (SWPP, Kanada, 2006)

Karte koje prikazuju zonu zaštite izvora ili zdenaca uzimaju u obzir okolno područje prihranjivanja do eksploatacijskih zdenaca, pri čemu se posebna pažnja posvećuje onečišćivačima u blizini koji mogu negativno utjecati na kvalitetu vode. Na karti je prikazana interakcija između potencijalnih izvora onečišćenja i područja prihranjivanja koja mogu pomoći u određivanju stvarnih zaštitnih mjera. U idealnom slučaju, identifikacija područja zaštite izvora trebala bi biti usklađena s hidrološkim i hidrogeološkim istraživanjima. Međutim, oni mogu biti prilično složeni i skupi. Ipak,

neka jednostavna pravila i pretpostavke mogu se primijeniti kao dio SWPP, koji još uvijek može rezultirati poboljšanjima kvalitete vode.

Zona zaštite zdenaca je područje oko zdenaca kroz koje onečišćivači mogu doprijeti u zdenac. Različite zone zaštite oko zdenaca temelje se na tome koliko je potrebno da onečišćenje uđe u bušotinu (Source Protection Region, 2007, slika 11 lijevo):

- područje od 100 metara: područje na kojem je najveći rizik za zdenac
- 2 godine horizontalnog toka: područje koje je bitno zbog bakterija i virusa iz ljudskog i životinjskog otpada
- 5 godina horizontalnog toka: biološki onečišćivači su manje prisutni, ali kemijski onečišćivači su razlog zaštite
- 25 godina horizontalnog toka: opasni onečišćivači koji se najduže zadržavaju u okolišu



Slika 11. Područje zaštite podzemnih voda (lijevo) i zone zaštite podzemne vode (desno) (SWPP, Kanada, 2006)

Zone zaštite od unosa onečišćujućih tvari i područje prihranjivanja vodonosnika. U ovom području, posebna pažnja je posvećena korištenju zemljišta i postupanju s mogućim onečišćivačima. A dijele se na 2 zone (Source Protection Region, 2007):

- zona za zaštitu od unosa onečišćujućih tvari (*Intake Protection Zone*, IPZ-1) je područje koje se smatra najranjivijim (slika 11 desno)
- zona za zaštitu od unosa onečišćujućih tvari (IPZ-2) smatra se visokim rizikom za svaki onečišćivač koji se prolije u toj zoni. U ovoj zoni je moguć unos onečišćivača u podzemlje već unutar 2 sata, što nepovoljno utječe na kakvoću vode

Procjena rizika za onečišćenje pitke vode

Nakon što se odrede numeričke vrijednosti za vjerojatnost onečišćenja i utjecaja onečišćenja (tablica 1), izrađuje se matrica analize rizika koja pruža brzu referencu za radni odbor za razumijevanje implikacija ocjene procjene rizika (tablica 2).

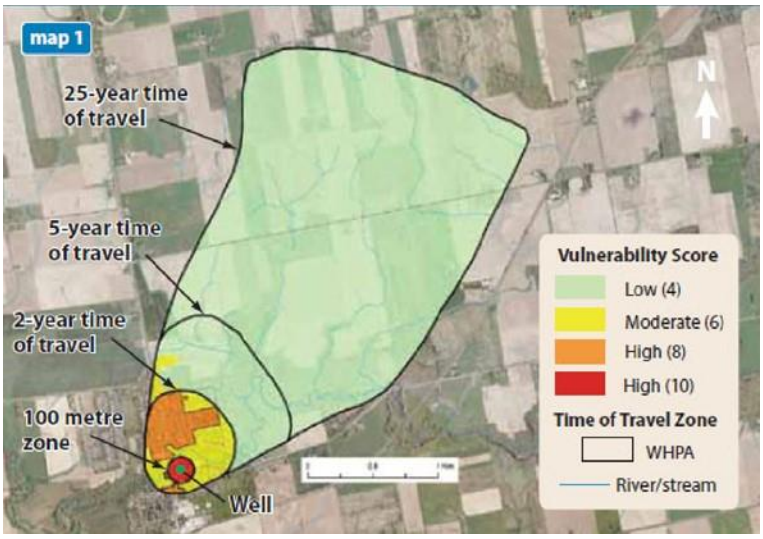
Tablica 1. Vjerojatnost onečišćenja (SWPP, Kanada, 2006)

Vjerojatnost onečišćenja	Vrijednost	Utjecaj
Gotovo nemoguće Izuzetno male šanse da se dogodi u idućih 4-5 godina	1	**Beznačajan** Nema zdravstvenog rizika
Malo vjerojatno Može se dogoditi u idućih 4-5 godina	2	**Mali** Kratkoročno ili lokalno nepoštivanje propisa
Vjerojatno Ravnomjerno podijeljena vrijednost između vjerojatno i nije vjerojatno da će se dogoditi u sljedećih 4-5 godina	3	**Umjeren** Dugoročno nepridržavanje propisa; nije povezano s zdravljem
Moguće Očekuje se da će se dogoditi u idućih 4-5 godina	4	**Ozbiljan** Potencijalni kratkoročni ili dugoročni učinci na zdravlje ljudi
Gotovo sigurno Uvjerenje da će se dogoditi barem jednom u idućih 4-5 godina	5	**Katastrofalan** Stvarne bolesti ili dugoročni učinci na zdravlje ljudi ili ekosustava

Tablica 2. Matrica analize rezultata procjene rizika (SWPP, Kanada, 2006)

Vjerojatnost pojave	**Utjecaj pojave**				
	Beznačajan 1	**Mali 2**	**Umjeren 3**	**Ozbiljan 4**	**Katastrofalan 5**
Gotovo nemoguće 1	Nizak 1	Nizak 2	Nizak 3	Srednji 4	Srednji 5
Malo vjerojatno 2	Nizak 2	Nizak 4	Srednji 6	Srednji 8	Visok 10
Vjerojatno 3	Nizak 3	Srednji 6	Srednji 9	Visok 12	Visok 15
Moguće 4	Srednji 4	Srednji 8	Visok 12	Visok 16	Visok 20
Gotovo sigurno 5	Srednji 5	Visok 10	Visok 15	Visok 20	Visok 25

Na temelju procjene rizika i zona zaštite oko zdenaca ili bušotina izrađuje se karta ranjivosti za određeno područje koje je bitno za eksploataciju podzemnih voda (slika 12).



Slika 12. Karta ranjivosti oko zdenca za eksploataciju podzemnih voda (Source Protection Region, Newmarket, Canada, 2007)

3.3 Zaštita aluvijalnih vodonosnika u Hrvatskoj

Republika Hrvatska hidrografski pripada slivu Jadranskog mora i slivu Crnog mora te se u skladu s tim i razlikuju dva vodna područja:

- vodno područje rijeke Dunav (VPD) i
- jadransko vodno područje (JVP)

Granica između vodnih područja na teritoriju Republike Hrvatske prati prirodnu hidrografsko hidrogeološku razvodnicu između jadranskog i crnomorskog sliva, koja je vezana uz pojavu vodonepropusnih klastita i slabo vodopropusnih dolomita u planinskom području Gorskog kotara i Like. Površina vodnog područja rijeke Dunav iznosi 35.117 km^2, što predstavlja 62 % hrvatskog kopnenog teritorija (PUVP, 2016). Okosnice otjecanja s vodnog područja su rijeke Sava i Drava, čija vododijelnica je reljefno određena i prolazi gorskim nizom Ivanščica - Kalnik - Bilogora - Papuk.

Područje podsliva Save zauzima 25.764 km^2 ili 73 % površine vodnoga područja, a područje podsliva Drave i Dunava 9.353 km^2 ili 27 % površine vodnog područja. Vodno područje rijeke Dunav u Republici Hrvatskoj je dio šireg međunarodnog vodnog područja Dunava. Aluvijalni vodonosnici u dravskom i savskom bazenu bogati su vodom i predstavljaju glavni vodoopskrbni resurs sjevernog dijela Hrvatske. Na krajnjem zapadu,

gdje nema krovinskih naslaga ili su one vrlo tanke, postoji otvoreni tip vodonosnika, zbog čega se prirodno napajanje odvija infiltracijom oborina neposredno u vodonosnik, koje se procjenjuje na više od 30 % prosječnih godišnjih oborina. Napajanje vodonosnika odvija se infiltracijom oborina kroz ove naslage. Prirodno napajanje vodonosnika u takvim uvjetima procjenjuje se na 10 – 20 % prosječnih godišnjih oborina (PUVP, 2016).

Zakon o vodama (NN 153/09, 63/11, 130/11, 56/13, 14/14) glavni je dokument za upravljanje stanjem voda u Republici Hrvatskoj. Ovim su Zakonom u pravni poredak Republike Hrvatske prenijete direktive Europske unije, kao što su: Direktiva 2000/60/EZ Europskog parlamenta i Vijeća od 23. listopada 2000. o uspostavi okvira za djelovanje Zajednice u području vodne politike (Okvirna direktiva o vodama) (SL L 327, 22. 12. 2000.), izmijenjena i dopunjena. Direktiva 2006/118/EZ Europskoga parlamenta i Vijeća od 12. prosinca 2006. o zaštiti podzemnih voda od onečišćenja i pogoršanja kakvoće (SL L 372, 27. 12. 2006.) te mnoge druge direktive koje su implementirane u pravni oblik ulaskom u Europsku uniju.

Strategija upravljanja vodama je osnovni planski dokument za upravljanje vodama na državnoj razini. Strategiju donosi Sabor Republike Hrvatske. Za svako vodno područje propisana je obveza donošenja planova upravljanja vodnim područjem, koji su osnove za upravljanje vodama na vodnim područjima i usuglašene su sa Strategijom upravljanja vodama, a donosi ih Vlada Republike Hrvatske svakih 6 godina. Plan upravljanja vodnim područjima izvršni je i planski dokument na temelju kojeg se prikupljaju prihodi i podmiruju izdaci za ostvarenje aktivnosti i mjera, mora biti usklađen s planovima upravljanja vodnim područjima, a donosi ga Upravno vijeće Hrvatskih voda za razdoblje od jedne godine. Trenutno važeći Plan upravljanja vodnim područjima 2016. - 2021. (NN 66/2016) izrađen je na temelju Zakona o vodama (Narodne novine, br. 153/09, 63/11, 130/11, 56/13 i 14/14).

Tijekom 2011. godine stupio je na snagu novi Pravilnik o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta (Narodne novine, broj 66/11), a tijekom 2013. godine Pravilnik o izmjenama pravilnika o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta (NN 47/13). Sva crpilišta za javnu vodoopskrbu u Hrvatskoj imala su obvezu do kraja 2014. godine provesti novelaciju zaštitnih zona i mjera zaštite sukladno novom pravilniku. Temeljem ovog Pravilnika zone sanitarne zaštite mogu se utvrditi, ukoliko su provedeni

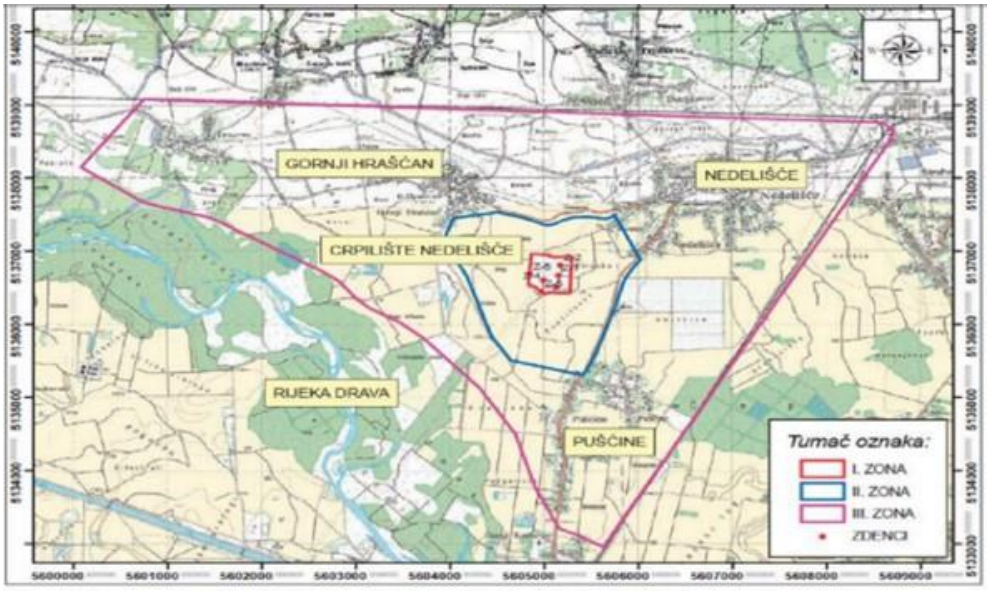
vodoistražni radovi koji uključuju: geološke značajke i hidrogeološke odnose priljevnog područja, hidrološke značajke priljevnog područja, veličina, granice i izdašnost vodonosnika, tip vodonosnika obzirom na poroznost (međuzrnska, pukotinska i pukotinsko – kavernozna), debljina i propusnost pokrovnih naslaga vodonosnika, način napajanja vodonosnika, način dotoka vode u akumulaciju ili jezero, brzina toka podzemne vode prema izvorištu, purifikacijski kapacitet pokrovnih naslaga i vodonosnika, kakvoća vode i analiza prirodnog sustava i ukupnog utjecaja ljudske aktivnosti te ako je izrađen elaborat zona sanitarne zaštite. Naručitelj vodoistražnih radova za nova izvorišta za javnu vodoopskrbu su Hrvatske vode.

Na temelju postojećih vodoistražnih radova naručitelj izrađuje nacrt elaborata zona sanitarne zaštite. Naručitelj je u obvezi zatražiti obvezujuće mišljenje Hrvatskih voda o nacrtu elaborata zona sanitarne zaštite. Ukoliko Hrvatske vode daju pozitivno mišljenje da su postojeći vodoistražni radovi dostatni, tada se kreće u izradu konačnog teksta elaborata zona sanitarne zaštite. U protivnom je potrebno provesti dodatne detaljne vodoistražne radove.

Zone sanitarne zaštite izvorišta sa zahvaćanjem vode iz vodonosnika s međuzrnskom poroznosti su (tablica 3):

- zona ograničenja i nadzora – III. zona, radi rizika onečišćenja podzemne vode od teško razgradivih opasnih i onečišćujućih tvari
- zona strogog ograničenja i nadzora – II. zona, utvrđuje se radi smanjenja rizika od onečišćenja podzemnih voda patogenim mikroorganizmima i drugih štetnih utjecaja koji se mogu pojaviti tijekom zadržavanja vode u podzemlju
- zona strogog režima zaštite i nadzora – I. zona, utvrđuje se radi zaštite izvorišta, vodozahvatnih građevina i njihove neposredne okolice od bilo kakvog oštećenja, onečišćenja vode te drugih slučajnih ili namjernih štetnih utjecaja (slika 13)

U zonama sanitarne zaštite provode se mjere pasivne i aktivne zaštite. Pasivne mjere moraju biti sastavni dio Odluke o zaštiti izvorišta. Mjere aktivne zaštite su: monitoring kakvoće voda na priljevnom području izvorišta, poduzimanje aktivnosti za poboljšanje stanje voda (gradnja vodnih građevina za vodoopskrbu i odvodnju, uvođenje čistih proizvodnji, i dr.), dok su mjere pasivne zaštite npr. uređaji za pročišćavanje otpadnih voda



Slika 13. Zone sanitarne zaštite na primjeru vodocrpilišta Nedelišće (Bačani i Posavec, 2007)

Tablica 3.Kriteriji zaštite aluvijalnih vodonosnika (NN 66/2011, NN 47/2013)

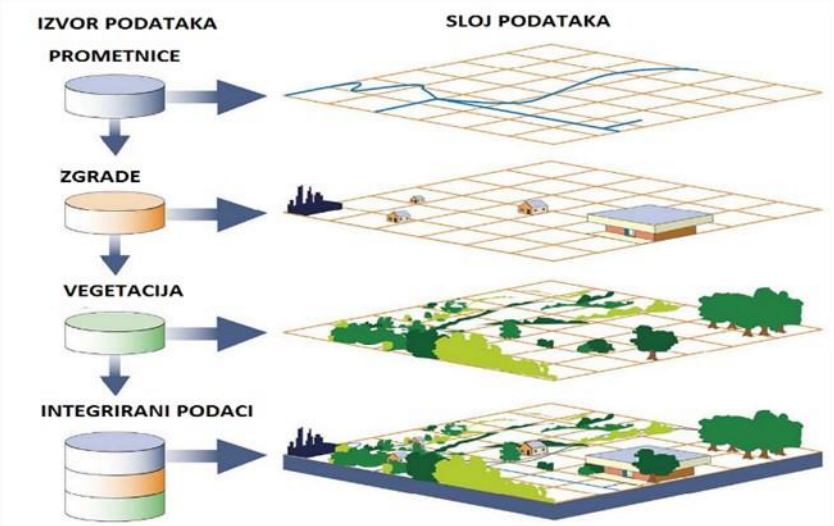
Zona strogog režima zaštite i nadzora	I	Najmanje 10 m oko objekta
Zona strogog ograničenja i nadzora	II	Od granice I. zone do vremena toka od 50 dana -za vertikalni tok vode veći od 50 dana zona se ne određuje
Zona ograničenja i nadzora	III	Za izvorišta max. kapaciteta < 20 l/s - od granice II. zone do izračunate granice područja napajanja za minimalno vrijeme zadržavanja vode u podzemlju u trajanju od **5 godina horizontalnog toka**, prije ulaza u vodozahvatnu građevinu
		Za izvorišta max. kapaciteta < 20-100 l/s - od granice II. zone do izračunate granice područja napajanja za minimalno vrijeme zadržavanja vode u podzemlju u trajanju od **15 godina horizontalnog toka**, prije ulaza u vodozahvatnu građevinu
		Za izvorišta max. kapaciteta > l00 l/s - od granice II. zone do izračunate granice područja napajanja za minimalno vrijeme zadržavanja vode u podzemlju u trajanju od **25 godina horizontalnog toka**, prije ulaza u vodozahvatnu građevinu

4 MOGUĆNOSTI PRIMJENE GIS-a U HIDROGEOLOGIJI

4.1 Osnovno o GIS-u

GIS (geografski informacijski sustav) danas postaje ključan za razumijevanje onoga što se događa i što će se dogoditi u geografskom prostoru. GIS omogućuje vizualizaciju, postavljanje upita, analizu i tumačenje podataka kako bi se razumjeli odnosi, obrasci i trendovi. GIS koriste organizacije svih veličina i gotovo u svakoj industriji. Postoji sve veći interes i svijest o ekonomskoj i strateškoj vrijednosti GIS-a. Prema ESRI-u (Environmental System Research Institute, 2001) GIS je skup hardvera, softvera i geografskih podataka koja služi za prikupljanje, spremanje, noveliranje, rukovanje, analiziranje i prikaz svih oblika geografski referenciranih podataka (Biondić R, 2010). Za rad GIS-a potrebno je imati računalo odnosno sustav hardware-a i software-a, zatim sami programski paket na kojem korisnik radi. Međutim, najvažnije od svega za kvalitetnu analizu i interpretaciju rezultata je sam korisnik koji bi morao biti kompetentan i osposobljen za rad takvim programom. Jedna od bitnih stavki je i dobra baza podataka. Baze podataka treba uvijek uzeti s dozom opreza jer nisu svi podaci uvijek točni, a netočnost podataka vodi do krivih analiza i interpretacija podataka. GIS se koristi za prikaz i analizu prostornih podataka koji su vezani za baze podataka. Ova veza je ono što GIS-u daje moć: karte se mogu izvući iz baze podataka, a podaci se mogu upućivati na karte. Kada se ažurira baza podataka, pridružena karta se također može ažurirati. GIS baze podataka uključuju široku paletu informacija, uključujući: geografsku, društvenu, političku, ekološku i demografsku. GIS koristi slojeve (slika 14), nazvane „teme“, kako bi se preklapale različite vrste informacija. Svaka tema predstavlja kategoriju informacija, kao što su ceste ili šumske površine.

GIS aplikacije na internetu i na bežičnim uređajima često se upotrebljavaju, ali nekad i korisnici o tome vrlo malo znaju. Ovi razvojni procesi čine GIS izvrstan alat za upravljanje informacijama o vodama, otpadnim vodama, obalnim vodama te za poboljšanje rada vodnih komunalnih usluga. Stručnjaci vjeruju da će u bliskoj budućnosti većina stručnjaka vodne industrije koristiti GIS na isti način na koji sada koriste program za obradu teksta ili proračunsku tablicu. Osim samog računala, nijedna tehnologija nije tako revolucionirala područje vodnih resursa (Lanfear, 2000).



Slika 14. Princip preklapanja slojeva (U.S. Government Accountability Office, 2012)

4.2 Mogućnosti primjene GIS-a u istraživanjima povezanima s vodnim resursima

Upravljanje i analiziranje fenomena vezanih uz vodu pomoću GIS-a olakšava njihovu upotrebu. GIS aplikacije su od posebne važnosti za upravljanje vodnim resursima. Potrebno je definirati neke od najvažnijih aktivnosti za učinkovito upravljanje vodom, npr. GIS se može koristiti za implementaciju „4M“ aplikacija u upravljanju vodama, koji je samo jedan od modela te uzima u obzir: mapiranje (engl. *mapping*), praćenje (engl. *monitoring*), modeliranje (engl. *modeling*) i održavanje (engl. *maintenance*) (Shamsi, 2005). Beskrajne su mogućnosti upravljanja GIS-om, samo je potrebno napraviti dobar model i na odgovarajući način napraviti analizu podataka. Razvojni modeli podzemnih voda često se suočavaju s odabirom o stupnju integracije GIS funkcija s modelom podzemne vode.

Različiti su stupnjevi integracije GIS-a i podzemnih voda:

- povezivanje GIS-a s modelom podzemne vode putem programa prijenosa podataka
- integriranje modela s GIS bazom podataka
- mogućnosti modeliranja unutar GIS-a

Arc Hydro model podataka (Maidment, 2002) definira „hidrološki informacijski sustav" koji je kombinacija geoprostornih i vremenskih podataka. Unos određenih parametara podzemnih voda je neophodan kako bi se pružio širi raspon primjena Arc Hydro korisnicima, kao i da bi se dobio model podataka koji preciznije odražava površinske i

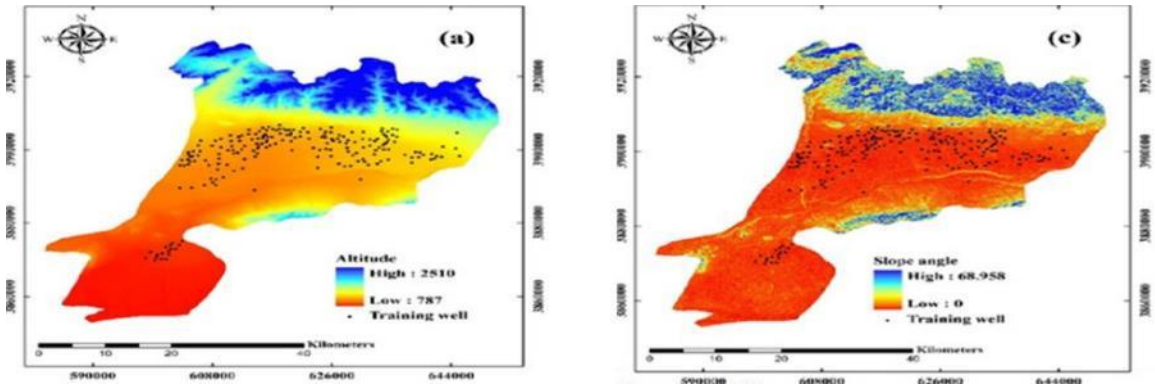
podzemne vode. Maidment i suradnici, 2004. godine proširili su Arc Hydro geobazu podataka te u koncepte uključili podzemne vode. Dodatak je to softwareu koji se odnosi na analizu podzemnih voda, a kreće se od regionalnih studija, koje obično opisuju protok u vodonosniku kao dvodimenzionalan, do istraživanja koja modeliraju trodimenzionalnu prirodu protoka kroz strukturu vodonosnika.

Geobaza podataka podzemnih voda usmjerena je na višedimenzionalni prikaz podzemnih voda u ArcGIS aplikaciji. Sastoji se od četiri glavne komponente: hidrogeologija, GeoMap, modeliranje (za objavljivanje modeliranih rezultata) i površine (rastere i trianguliranе nepravilne mreže [TINs]). Hidrogeološki skup podataka je skup vektorskih podataka (točaka, linija, poligona) koji predstavljaju hidrogeološke značajke koje se koriste u studijama podzemnih voda. Skup podataka za modeliranje je skup vektorskih podataka koje mogu predstavljati uobičajene objekte za modeliranje, kao što su stanice i elementi. Ovaj skup podataka prvenstveno se koristi za objavljivanje rezultata studija modeliranja unutar GIS-a. Površinski podaci obuhvaćaju i rastere i TIN podatke i koristi se za definiranje visina ili prostorno varijabilnih parametara vodonosnika.

2-D model podataka može se koristiti za proučavanje pojedinih parametara vodonosnika te kao pomoć kod simulacije transporta pojedinog onečišćivala. Podaci o rubovima već postoje u Arc Hydro modelu podataka (HydroEdge); stoga se samo podatkovni model mora dodati skupinama vodonosnika i odabrati njihova obilježja. Osim odnosa između riječnih rubova i vodonosnika, također se može odrediti povezanost zdenaca i vodonosnika. Zdenci su povezani s vodonosnicima kroz identifikator vodnosnika (AquiferID). Jednom kada se uspostave odnosi između rubova mreže, vodonosnika i bunara, mogu se prikazati aplikacije kao što su vodna bilanca, punjenje/pražnjenje vodonosnika i transport otapala između sustava površinske i podzemne vode. 3-D prikaz geološkog okvira, svojstva vodonosnika i bušotina unutar podzemnih sustava pruža napredne mogućnosti za regionalne studije podzemnih voda, kao i istraživanja na terenu. 3-D model podataka omogućuje modeliranje podzemnih voda s software-om kao što je MODFLOW (Johnson, 2009).

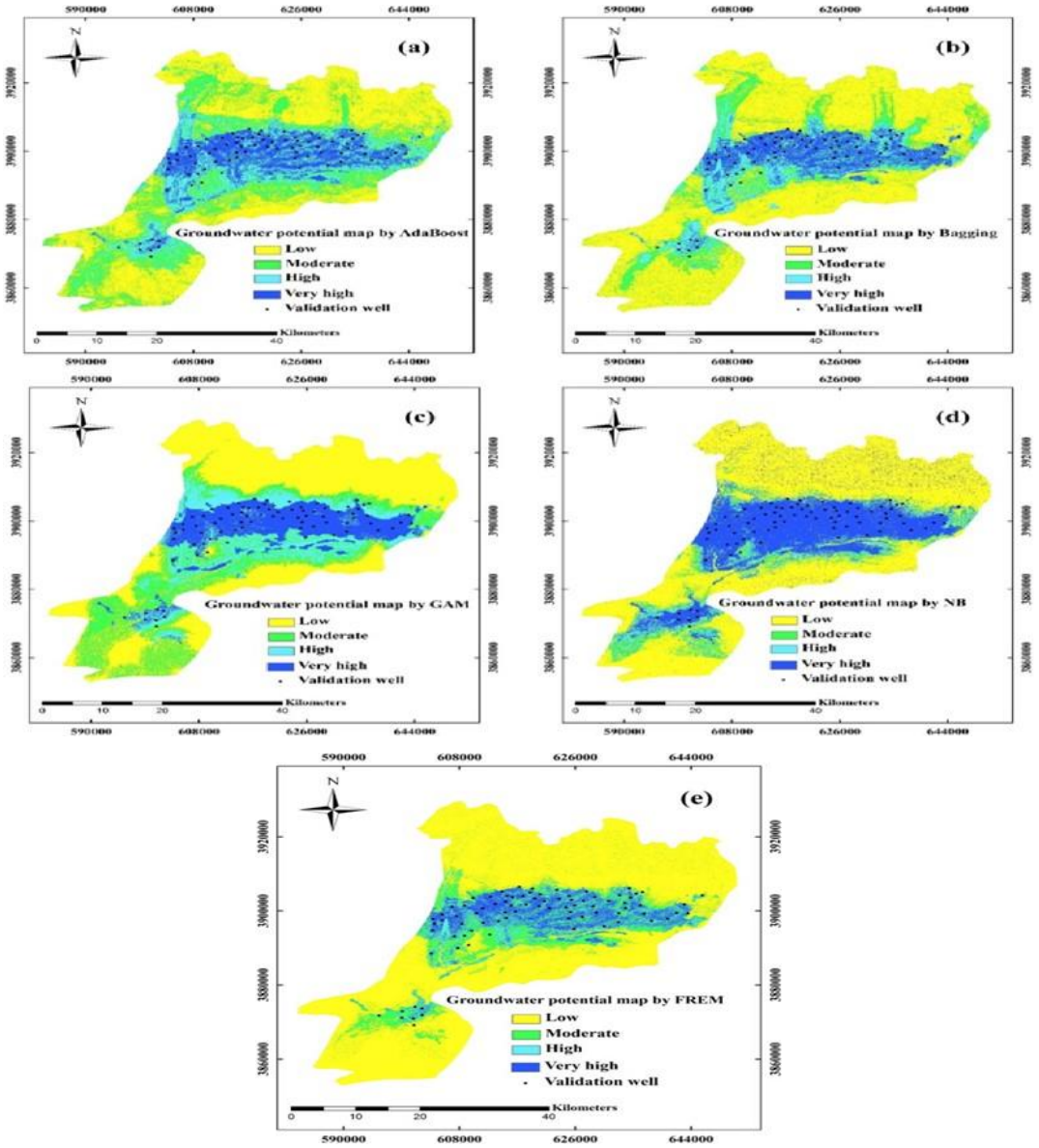
4.2.1 Primjena GIS-a kod određivanja moguće raspoloživosti količina podzemnih voda

Podzemne vode se koriste u sve većim količinama, upravo zbog svojih pozitivnih svojstava koja su dosad opisana u ovom radu. Za procjenu moguće raspoloživosti količine podzemnih voda potrebna je kvalitativna i kvantitativna procjena podzemnih vodnih resursa. Kartiranje raspoloživosti količina podzemnih voda jedan je od važnih aspekata studija podzemnih voda koji bi pomogao upraviteljima vodnih resursa da imaju bolje planove iskorištavanja i očuvanja (Naghibi i sur., 2016). Različiti istraživači implementirali su modele u različitim područjima istraživanja kao što su klizišta i modeliranje poplava i sl., dok je primjena modeliranja u kartiranju raspoloživosti količine podzemnih voda relativno novo. Jedna o takvih primjera je FREM (*Frequency Ratio data Mining Ensemble Model*, Naghibi i sur., 2016) koji je izrađen uz pomoć različitih setova prostornih podatak povezanih s mogućim kretanjem i raspodjelom podzemnih voda u regiji Kashmar u Iranu. Podaci su dobiveni iz 281 odabrane bušotine. Digitalni model terena (DEM) je korišten kao ulazni podatak za izdvajanje različitih topografskih čimbenika (nadmorske visine, nagiba, kut nagiba terena) jer vrlo često ovi čimbenici imaju veliki utjecaj na potencijal podzemne vode (slika 15).



Slika 15. Karta nadmorske visine (a) i karta nagiba (b) (Naghibi i sur., 2016)

Na temelju dobivenih karata i implementacijom FREM-a i određenih modela koji se koriste u rudarstvu (AdaBoost, Bagging, GAM i NB modela) te uz pomoć GIS-a dobivene su karte potencijala podzemnih voda (slika 16).



Slika 16. Karte moguće raspoloživosti količina podzemnih voda dobivene: AdaBoost, Bagging, GAM i NB i FREM modelima (Naghibi i sur., 2016)

4.2.2 Primjena GIS-a kod kanalizacijskih sustava

Hidraulički modeli, GIS i alati za upravljanje podacima rutinski se koriste za pomoć u planiranju i projektiranju kanalizacijskih sustava. Često se GIS upotrebljava kao jednostavan procesor prostornih podataka kod modeliranja urbane oborinske odvodnje. Ovdje GIS može jednostavno pohraniti geografske podatke u bazu podataka ili se može koristiti za izračun ulaznih parametara iz pohranjenih geografskih podataka. Danas postoji niz programskih paketa za modeliranje kanalizacijske mreže i otpadnih voda s GIS sučeljima. Neki se paketi temelje na softveru za upravljanje vodom u javnoj domeni (*Storm Water Management Model*, Rossman, 2007). SWMM je dinamičan simulacijski

model koji se koristi za pojedinačni događaj ili dugoročne (kontinuirane) simulacije količine i kvalitete otpadnih voda iz primarno urbanih područja. GIS podržava niz funkcija prostorne analize koje su idealne za dizajn kanalizacijskih sustava (Greene i sur., 1999). Ove funkcije prostorne analize koriste se za procesiranje podataka, a oni uključuju: identifikaciju željenih mjesta za šahtove, stvaranje trokutaste nepravilne mreže (TIN), stvaranje prethodne kanalizacijske mreže kao TIN pomoću lokacija i njihovih šahtova, utvrđivanje potencijalnih vodova za kanalizacijsku mrežu, uklanjanje kanalizacijskih vodova koji prelaze zabranjena područja i grafički prikaz rezultata.

4.2.3 Primjena GIS-a kod zaštite od poplava

GIS koncepti i alati se opsežno primjenjuju za kartiranje poplavnih područja. Podaci potrebni za svrhe kartiranja i upravljanja poplavnim područjima sastoje se od tri opće skupine: topografski podaci za potporu hidrološkom modeliranju, fizički podaci o izgrađenim objektima za sustav odvodnje i njihove građevine te administrativni podaci o granicama nadležnosti. Ti se podaci dobivaju iz raznih izvora. Pomoću različitih GIS postupaka i tehnologija svi ti podaci prikupljeni su u sveobuhvatan skup podataka koji podupire projektne potrebe i dugoročne višenamjenske ciljeve upravljanja. Podaci o poplavljenim terenima razlikuju se od grubljeg presjeka u točnosti i preciznosti. GIS alati pružaju sredstvo za maksimalno korištenje dobivenih podataka presjeka kanala po geografskoj izmjeri. Zračnim fotogrametrijskim LIDAR (*Light Detection And Ranging*) tehnikama se također može doći do korisnih podataka. LIDAR tehnologija omogućava prikupljanje podataka o visini, visoke razlučivosti s platforme koja se prenosi zrakom (Johnson, 2009). Postprocesiranje filtara i uređivanje sirovih LIDAR podataka donose skup podataka o visini gdje se vegetacija, zgrade i drugi podaci učinkovito uklanjaju s terenskog modela. Na temelju svih tih podataka i uz pomoć stručne osobe GIS nam daje preglednu kartu područja koja su u najvećoj ili najmanjoj opasnosti uzimajući u obzir i neke statističke parametre npr. pojavljivanje stoljetnih poplava.

4.3 Mogućnost primjene GIS-a u zaštiti aluvijalnih vodonosnika

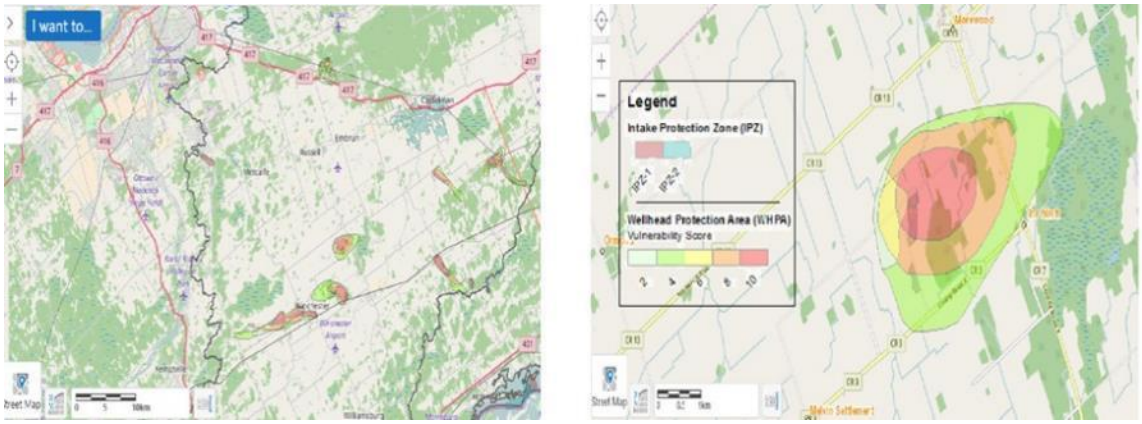
Na temelju dosadašnjih analiza mogućnosti primjene GIS-a je vidljivo da se trenutno koristi najviše u svrhu prostornog prikaza zona sanitarne zaštite. GIS se također koristi i

kao alat za implementaciju matematičkog modela prilikom određivanja zaštite podzemnih voda u intergranularnim vodonosnicima. Međutim, razvijanjem računalnih znanosti i sve daljnjim napretkom tehnologije, usporedno se i razvija GIS. Ovaj razvitak dovodi do eksponencijalnog širenja GIS-a u upravljanju i zaštiti vodonosnika. Korisnici odnosno istraživači sve više pokušavaju implementirati nove metode u GIS, kako bi što bolje zaštitili podzemne vode. Razumijevanje procesa koji se događaju u podzemlju osnovna je pretpostavka učinkovite zaštite voda, a u tom razumijevanju je GIS od velike pomoći.

4.3.1 GIS kao alat za prikaz zaštitnih zona

GIS nam omogućuje da vrlo precizno i pregledno označimo područja koja štitimo i koja su nam od posebnog značaja. Zbog toga se sve više koristi implementacija GIS-a kao obaveznog alata u izradi zona zaštite podzemnih voda. U Republici Hrvatskoj prema Pravilniku o uvjetima određivanja zona sanitarne zaštite (NN, 66/11, 47/13) naručitelj vodoistražnih radova je u obvezi dostaviti Hrvatskim vodama elaborat zona sanitarne zaštite u digitalnom obliku pogodnom za daljnju obradu u GIS aplikacijama te aplikacijama za tablične kalkulacije i aplikacijama za obradu teksta, usklađenih s Informacijskim sustavom voda. Prema tome, vidljivo je da je bitno urediti podatke za daljnje korištenje u GIS-u. Međutim, nema zakonskog akta kojom je obavezno da se u odlukama o zonama sanitarne zaštite koristi i GIS, koji bi trebao biti jedno od ključnih pomoći u konačnoj odluci uspostave područja kojim se protežu zone sanitarne zaštite.

U prijašnjim poglavljima, kao jedan od primjera zaštite aluvijalnih vodonosnika u svijetu je uzeta i Kanada. Zone za zaštitu podzemnih voda se dijele na 2 zone : IPZ (1) područje koje je najranjivije i IPZ (2) područje koje je direktno povezano s podzemnim vodama i u vrlo kratkom roku onečišćenje ulazi u podzemlje. Uz te zone također se primjenjuje procjena ranjivosti vodonosnika koje uzima u obzir područje oko zdenaca (*Wellhead Protection Area*, WHPA). U tim postupcima bitan alat za prikaz zona je i GIS, pomoću slojeva koji se implementiraju na postojeću kartu. Na temelju toga izrađen je web alat koji pokazuje gdje su područja zaštite površinskih voda (IPZ) i područja za zaštitu zdenaca (WHPA). Ovaj alat omogućuje korisnicima da u svakom trenutku imaju uvid koje područje je pod kojom vrstom zaštite (slika 17).



Slika 17. Prikaz zaštitnih zona koristeći GIS alate (Geoportal Kanada, Ontario, 2017)

4.3.2 GIS kao alat za implementaciju matematičkog modela u aluvijalnim vodonosnicima

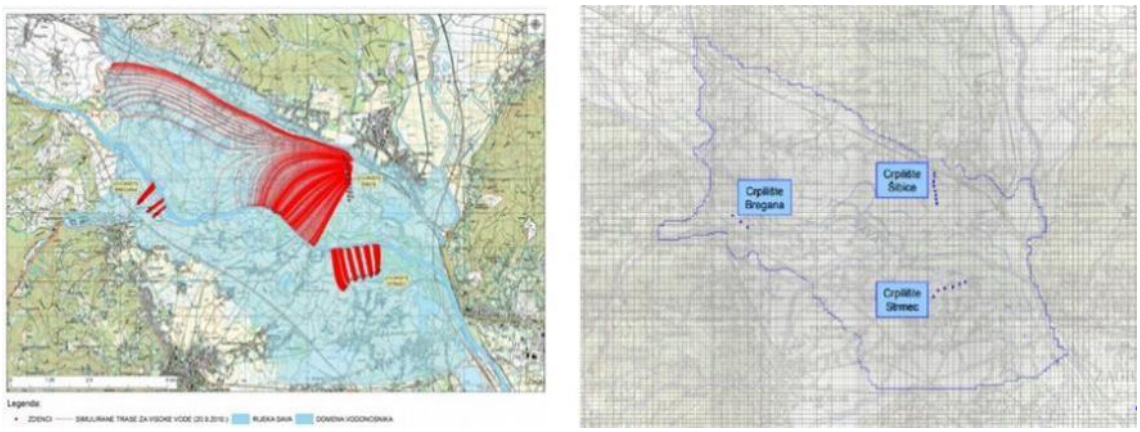
Uz GIS kao alat za prikaz zaštitnih zona koji je opisan u prethodnom poglavlju, jedna od mogućnosti je korištenje GIS-a kao alata za implementaciju matematičkog modela koji se koristi prilikom određivanja zaštite podzemnih voda u aluvijalnim vodonosnicima.

Kao osnova za izradu prijedlog granica zona sanitarne zaštite vodocrpilišta Strmec, Šibice i Bregana korišten je kalibrirani i verificirani numerički model toka podzemne vode za postojeće stanje izgrađenosti, izrađen za potrebe analize utjecaja višenamjenskog hidrotehničkog sustava uređenja, zaštite i korištenja rijeke Save od granice s Republikom Slovenijom do Siska (koncept sustava) na podzemne vode samoborsko-zaprešićkog vodonosnika (Posavec i sur., 2013), dok su same granice zona sanitarne zaštite određene modelom trasiranja čestica.

Model toka podzemne vode kreiran je za potrebe simulacija toka podzemne vode i trasiranja čestica s ciljem određivanja odnosno delineacije zaštitnih zona vodocrpilišta Strmec, Šibice i Bregana. Rezultati simulacije toka i trasiranja čestica korišteni su za procjenu druge i treće zaštitne zone vodocrpilišta kako je to definirano Pravilnikom o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta (NN, 66/11, 47/13). Konceptualni model samoborskog vodonosnog sustava definiran je koristeći bazu podataka i bazu znanja projekta Evidencija i gospodarenje podzemnim vodama (EGPV i EGPV-GIS). U radu je korišten ArcView GIS program u čijim projektima je integrirana EGPV baza

podataka i baza znanja zajedno s grafičkim vektorskim i rasterskim podlogama. Kriterij za odabir računalnog programa bio je da njegove mogućnosti budu prikladne zadatku i karakteristikama samoborskog vodonosnog sustava. Program je trebao adekvatno opisati mehanizme toka u opisanim litostratigrafskim i hidrološkim okolnostima. Za simulacije toka podzemne vode odabran je MODFLOW program (McDonald & Harbaugh, 1988) koji se danas u svijetu vrlo često koristi za simulacije toka podzemne vode, a za simulacije trasiranja čestica odabran je MODPATH program. Programi MODFLOW i MODPATH su sastavni dio programskog paketa Visual Modflow koji je korišten za potrebe izrade ovog zadatka, a koji predstavlja grafičko sučelje uz pomoć kojeg se vrši unos ulaznih podataka i kreiranje ulaznih datoteka za MODFLOW i MODPATH programe, provođenje simulacija te prikaz i statistička obrada rezultata simulacija (Bačani i Posavec, 2008).

Diskretizacijom se domena modela samoborskog vodonosnog sustava podijelila na niz manjih cjelina odnosno ćelija pravokutnog oblika (slika 18). Ovakvu diskretizaciju uvjetuje MODFLOW koji tok podzemne vode simulira koristeći pristup konačnih diferencija. Diskretizacija je primarno omogućila definiranje heterogenosti sustava. Digitalni model reljefa kreiran je na osnovu topografskih karata M 1:25000 (ekvidistanca = 10 m) (Bačani i Posavec, 2008).

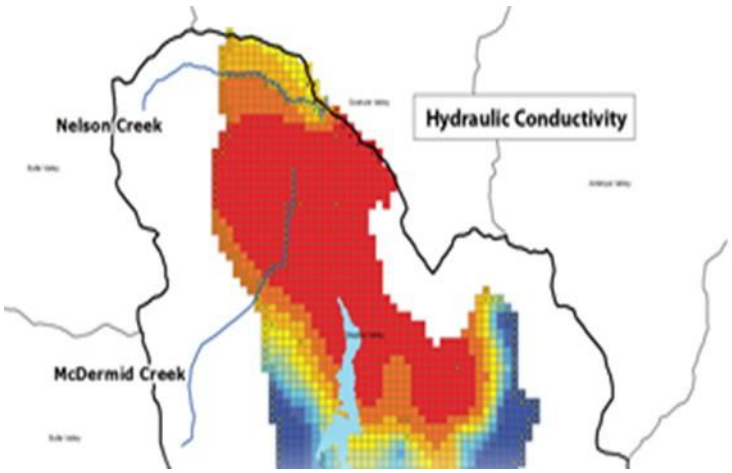


Slika 18. Simulirane trase za visoke vode (lijevo) i horizontalna diskretizacija modela (desno) (Bačani i Posavec, 2008)

Primjer MODFLOW modela podzemne vode podržan od strane GIS-a pokazao je Rindahl (1996) za Cherry Creek, aluvijalni vodonosnik u blizini Denvera u Coloradu. Izvorni model sastojao se od rešetke veličine 72 stupca × 244 retka. Unijeti su parametri

modela za svaku ćeliju. Ulazni parametri u model za svaku ćeliju su uneseni u tablice koje MODFLOW program učitava. Dodatni parametri kao što su tok vode, crpljenje i vremensko razdoblje također su uneseni u program. Izlazni parametri su obično podizanje podzemnih voda, odstupanje od početnih uvjeta i tok podzemne vode (Johnson, 2009).

Projekt je koristio ArcView GIS za pripremu modela podzemne vode i analizu rezultata simulacije. Ulazne datoteke su teške i dugotrajne za konstruiranje, a nakon unosa ulaznih datoteka, buduće izmjene predstavljaju izazov. Prikazivanje rezultata MODFLOW simulacijom zahtijeva naknadno obradu softvera, koji obično ne prikazuje model ili informacije u georeferenciranom formatu. GIS se smatra mogućim rješenjem izazova sučelja s MODFLOW modelom. ArcView, pomoću Spatial Analyst, koji je korišten kao učinkovit alat za predtretman i naknadnu obradu MODFLOW podataka, dobiveno je da bi ArcView mogao prikazati pražnjenje, strujanje toka i prihranjivanje vodonosnika pomoću simulacije MODFLOW. Upotrebom ArcView-a te sposobnost pridruživanja modela GIS podataka (coverage), razvijeno je jednostavno sučelje za prikazivanje i analizu složenih simulacijskih rezultata modela. Sljedeći korak u povezivanju ArcView-a s MODFLOW-om bio je korištenje ArcView-a kao metode za razvoj ulaznih datoteka MODFLOW (slika 19).



Slika 19. Primjer upravljanja MODFLOW modelom unutar ArcGis-a (Aquaveo, 2016)

ArcView je uspješno korišten za stvaranje ulaznih datoteka MODFLOW za određivanje toka podzemnih voda. Taj je alat omogućio korisnicima MODFLOW-a stvaranje i manipulaciju složenih ulaznih datoteka MODFLOW na jednostavan i učinkovit način. Omogućene su modifikacije u programu i dodatne analize te stvaranje vlastitih ulaznih podataka i situacija, koje bi nam pomogle kod zaštite podzemnih voda. Jedna od glavnih

prednosti korištenja ArcViewa za unos podataka u model je bila pojednostavljivanje ponavljajućih i teških zadataka prilikom kreiranja ili izmjene velikih tekstualnih datoteka ulaza MODFLOW. Kako bi se pomoglo u analizi rezultata MODFLOW modela, razvijena je ArcView aplikacija koja pruža jasan, georeferencirani prikaz rezultata modela. Korištenjem obrasca MODFLOW u GIS-u moguće je provesti različite pomoćne analize, poput mjerenja udaljenosti, blizine i dubine slojeva (Johnson, 2009).

5 POTREBNE PODLOGE ZA PRIMJENU GIS-a u ZAŠTITI ALUVIJALNIH VODONOSNIKA

5.1 Zahtjevi GIS-a s obzirom na postojeću primjenu u zaštiti

Kod izrade Elaborata o zonama sanitarne zaštite, dokument treba sadržavati detaljni dinamički plan aktivnosti koje će se predložiti za provedbu u narednom petogodišnjem razdoblju. Svi kartografski prikazi trebaju biti izrađeni digitalnim rasterskim zapisom i georeferentnim vektorskim zapisom u službenoj kartografskoj projekciji, pogodnim za daljnju obradu u aplikacijama usklađenim s informacijskim sustavom naručitelja (GIS). Dakle za daljnju prostornu analizu bitno je da su podaci usklađeni i primjenjivi s GIS tehnologijom. Temeljni grafički iskazi sa svim potrebnim podacima za IV. i III. zonu su mjerila 1:25.000, za II. zonu mjerila 1:5.000, a za I. zonu mjerila 1:1.000.

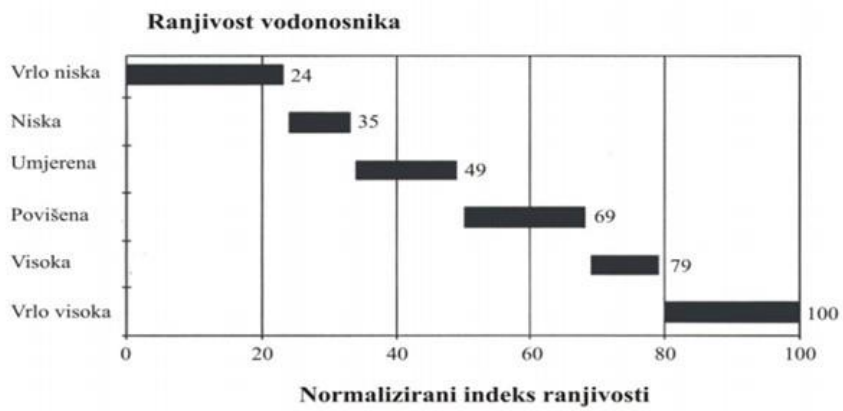
U Republici Hrvatskoj GIS se još uvijek koristi kao alat koji nam pomaže kod prostorne analize i kao pomoć kod izrade karata te prikaz zona sanitarne zaštite na karti. Za potrebe ocjene stanja kakvoće podzemne vode unutar svih cjelina, u sukladnosti sa zahtjevima Okvirne direktive o vodama i Direktive o zaštiti podzemnih voda od onečišćenja i pogoršanja kakvoće (2006/118/EZ) za svaku od izdvojenih cjelina podzemne vode provedena je analiza opterećenja i utjecaja ljudske djelatnosti na podzemne vode. Raspoloživi izvori onečišćenja razvrstani su u skupine točkastih i raspršenih izvora, a svi relevantni podaci unijeti su u GIS bazu podataka. Dakle, to je još jedna od primjena GIS-a koja nam ukazuje na onečišćivače koji su potencijalno opasni za podzemne vode, te na taj način brzo i pregledno možemo koristiti te podatke u daljnjim projektima i analizama koje nam pomaže u zaštiti podzemnih voda.

U sklopu procjene rizika cjelina podzemne vode provedena je analiza prirodne ranjivosti vodonosnika za cjelokupno područje panonskog dijela RH (Brkić i sur., 2009). Ona je realizirana primjenom SINTACS postupka (Civita i De Maio, 1997) koji pripada skupini svjetski priznatih „point count“ modela. U tu je svrhu definirano sedam tematskih slojeva koji predstavljaju ocjenu prirodnih svojstava hidrogeološkog sustava: dubina do podzemne vode, efektivna infiltracija padalina, obilježja nesaturirane zone vodonosnika, obilježja saturirane zone vodonosnika, svojstva tla, hidraulička vodljivost vodonosnika i nagib topografske površine. Prostorna analiza je načinjena uz pomoć rastera koji su

posebno kreirani za svaki tematski sloj. Veličina elemenata prostorne mreže iznosi 500 m. Definiranje tematskih slojeva, izrada rastera te njihovo dovođenje u međusobnu vezu sukladno SINTACS preporukama, napravljeno je u GIS okružju (Brkić i sur., 2009).

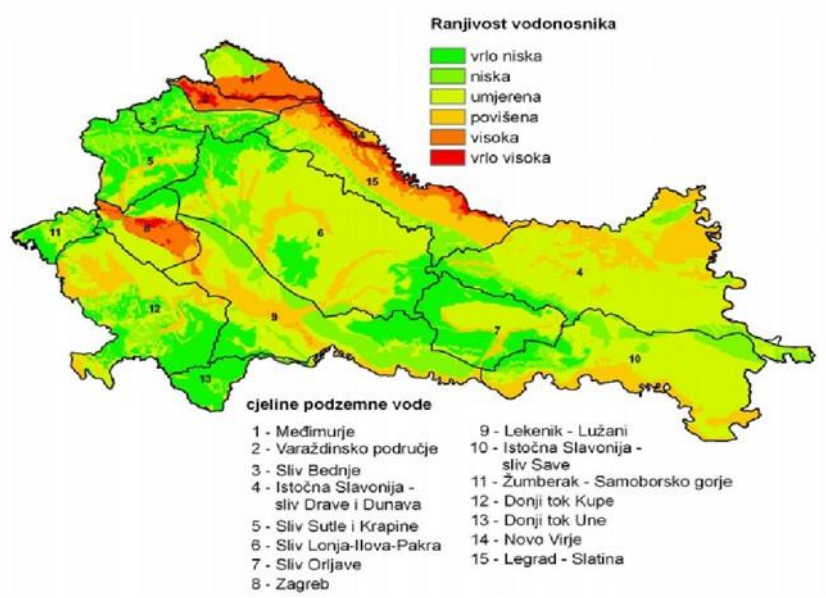
Na temelju rezultata postupka, područje je podijeljeno u šest kategorija ranjivosti, u rasponu od vrlo niske do vrlo visoke:

- vrlo visoka i visoka ranjivost karakteristične su za aluvijalne vodonosnike vrlo dobrih hidrauličkih svojstava, s razmjerno malom dubinom do podzemne vode i slabom zaštitnom funkcijom nesaturirane zone i tla
- povišena ranjivost postignuta je za aluvijalne vodonosnike na mjestima gdje je izraženija zaštitna uloga tla ili debljina krovine prelazi 5 m, za manje aluvijalne vodonosnike slabijih hidrauličkih svojstava te za neke karbonatne vodonosnike
- umjerena ranjivost vodonosnika karakteristična je za aluvijalne vodonosnike razmjerno dobrih hidrauličkih svojstava, ali sa značajnom zaštitnom funkcijom krovinskih naslaga vodonosnika i tla, za vodonosnike uglavnom slabih hidrauličkih svojstava, ali s razmjerno malom dubinom do vode i slabim zaštitnim svojstvima nesaturirane zone i tla kao i za većinu karbonatnih vodonosnika u planinskim predjelima panonske Hrvatske
- niska i vrlo niska ranjivost većinom je postignuta u planinskim predjelima izgrađenim od stijena slabih do vrlo slabih hidrauličkih svojstava kao i za aluvijalne vodonosnike s povoljnom zaštitnom funkcijom tla i debljinom krovine većom od 30 m (slika 20)



Slika 20. SINTACS – kategorizacija prema normaliziranom indeksu ranjivosti vodonosnika (Civita i De Maio, 1997)

Temeljem rezultata ocjene cjelokupan prostor istraživanja podijeljen je u šest kategorija u rasponu vrlo niske do vrlo visoke ranjivosti (slika 21). Primjenom opisanog postupka kategorizacije u praksi se može dogoditi da susjedni elementi prostorne mreže pripadaju različitim kategorijama ranjivosti iako su male razlike u vrijednostima indeksa ranjivosti.



Slika 21. Karta prirodne ranjivosti vodonosnika (Brkić i sur., 2009)

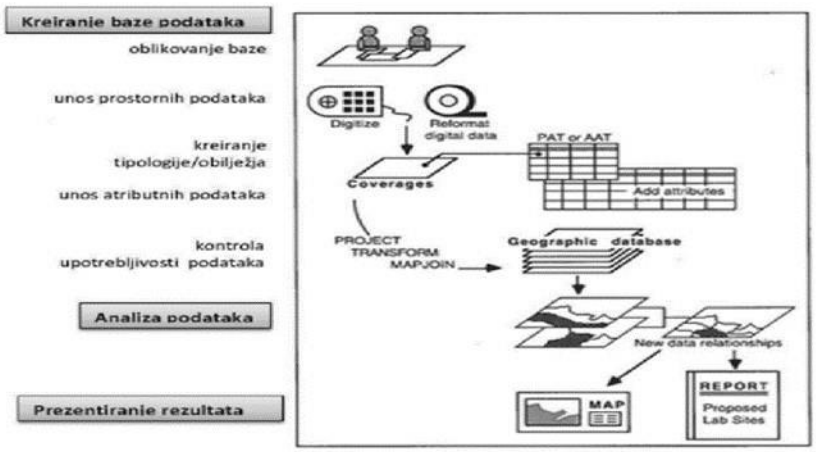
5.2 Zahtjevi GIS-a s obzirom na buduću primjenu u zaštiti

5.2.1 Planiranje GIS projekta

U okviru rješavanja određenog projektnog zadatka (ili realizacije projekta) kao cjelovitog i složenog posla čija su obilježja i cilj definirani, a ostvaruje se u određenom vremenu, kreira se GIS projekt. Procesu stvaranja prethodi određivanje cilja GIS projekta na način da se utvrdi koje se pitanje/zadatak rješava, analizira efikasnost do sad primjenjivanih rješenja, ustanovi postoje li alternativni načini rješavanja koristeći GIS, definira što je konačni proizvod (izvještaj, karta, prezentacija) te identificira korisnik (broj, kategorija). Razvoj GIS projekta organiziran je nizom propisanih radnji koje se mogu rasporediti u 3 koraka (slika 22).

U prvom se koraku kreira baza podataka (engl. *database*), čija cjelovitost i točnost definira razinu kvalitete analiza i konačni rezultat, a uključuje:

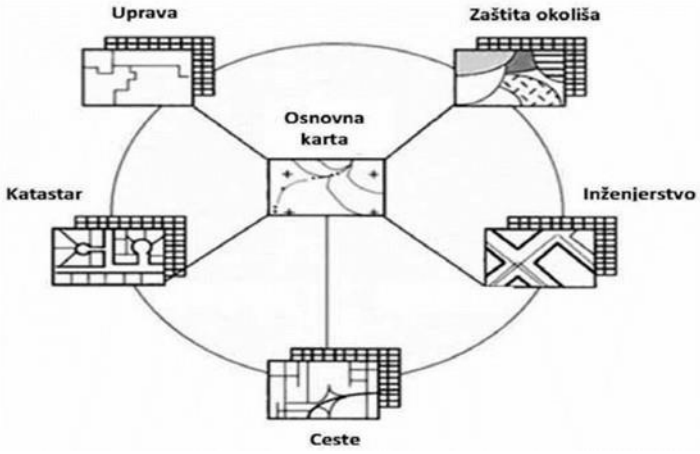
- utvrđivanje koordinatnog sustava, obuhvata, potrebnih slojeva, značajki i pripadajućih atributa, unos prostornih podataka u bazu podataka (digitaliziranje ili konvertiranje podataka iz drugih sustava)
- omogućavanje korištenja prostornih podataka (verifikacija/kontrola upotrebljivosti podataka i kreiranje tipologije/obilježja)
- dodavanje atributnih podataka u bazu podataka (unos i povezivanje s prostornim značajkama)
- kontrola upotrebljivosti baze podataka (provjera tipologije za obuhvat, provjera točnosti lokacije svih značajki, provjera atributnih tablica, značajki i vrijednosti, stavljanje prostornih podataka u koordinatni sustav, spremanje povezanih obuhvata u zajednički koordinatni sustav, prostorno referenciranje značajki u povezanim obuhvatima)



Slika 22. Razvoj GIS projekta (ESRI, 1992)

Drugi korak podrazumijeva provođenje vremenski i/ili po obimu zahtjevnih analiza. GIS učinkovito provodi analitički postupak, a alternativni scenariji se lako razvijaju uz manje intervencije u analitičku metodu. Treći korak je rezerviran za prezentaciju rezultata analize, a ostvaruje se stvaranjem prilagođenih karata i izvješća. Prikazani postupak je potrebno prilagoditi specifičnostima pojedinog zadatka. Konačan proizvod je izravno povezan s ciljevima kao i sa specifičnim korisnikom koji se utvrđuju na početku projekta. Vještina prezentacije rezultata određuje utjecaj analize na proces odlučivanja (Grizelj Šimić, 2014).

GIS aplikacijski sustav je sustav u kojemu obimna stručna baza podataka može udovoljiti potrebama različitih korisnika u određenoj geografskoj sredini (površini, području). Različite agencije odgovorne su za pojedine podatkovne cjeline, no nadležnost nad sveukupnom bazom im je zajednička kako bi se izbjeglo dupliranje napora (rada) i podataka te stvaranja nekonzistentnih dokumenata. Adekvatno planiran i implementiran aplikacijski sustav omogućuje upotrebu različitim korisnicima, s različitim pogledom na bazu podataka, a ujedno umanjuje ili uklanja redundanciju i nekonzistentnost (slika 23).



Slika 23. Stvaranje GIS aplikacijskog sustava (ESRI, 1992)

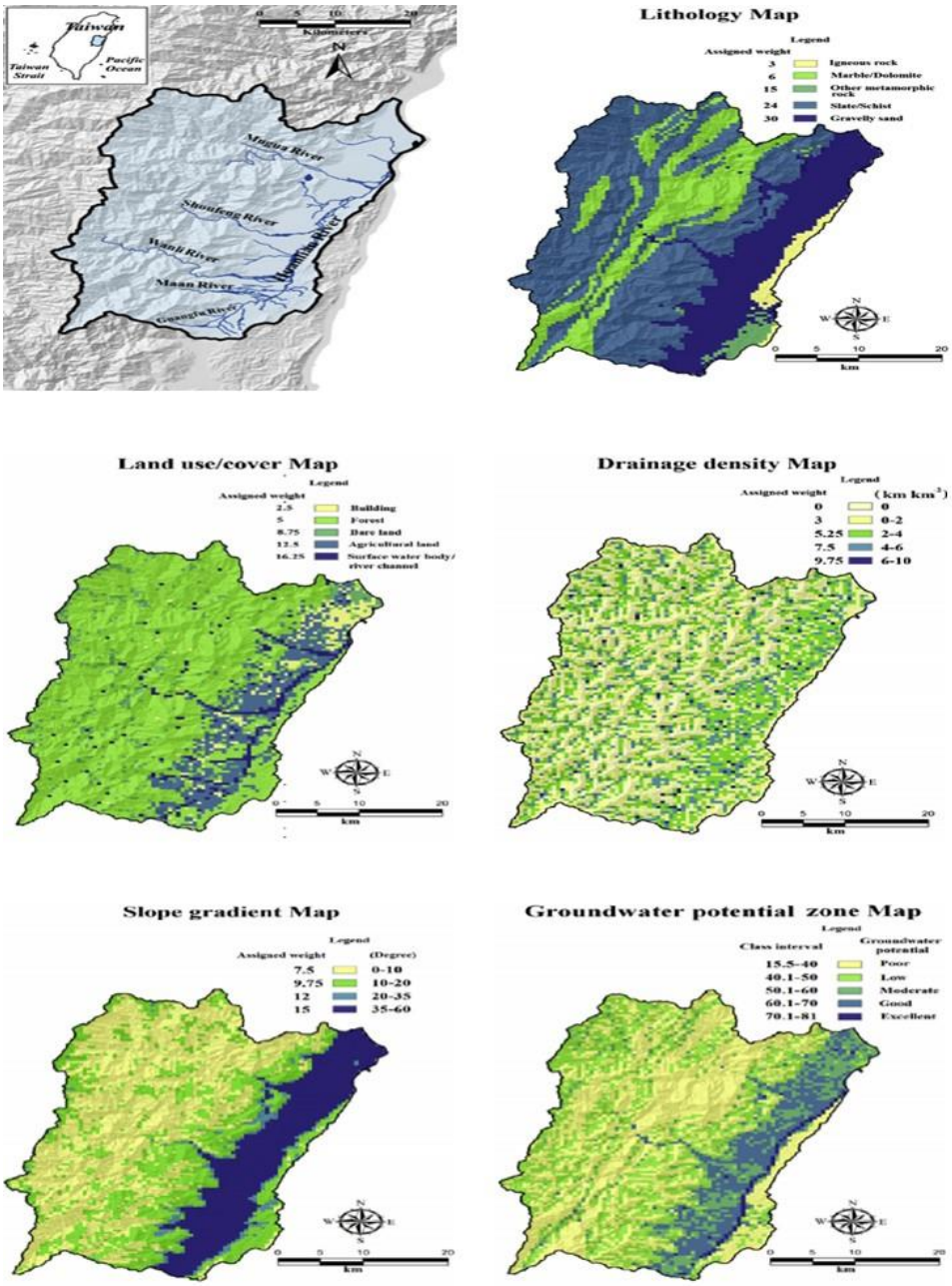
5.2.2 Potrebne podloge

Temelj upotrebljivog modela podzemnih voda je dostupnost visokokvalitetnih podataka. GIS-ovi podaci obično sastavni su dio sustava baze podataka koji pomažu organiziranju, pohranjivanju i prikazivanju znatnog niza potrebnih informacija. Glavne vrste podataka kao npr. infiltracija ili količina oborina, moguće je utvrditi tokom hidrološke analize. Ostali podaci i informacije, kao što su geološke i hidrogeološke karte, zahtjevnije su i skuplje za dobivanje i njihova izrada može se raditi godina. Ipak, drugi podaci, kao što je povijest razina podzemne vode u različitim dijelovima sustava vodonosnika, zahtijevaju predviđanje kako bi se dobila mjerenja tijekom vremena. Podaci mogu sadržavati dubine i debljine hidrogeoloških jedinica iz litoloških i geofizičkih zapisa, mjerenja na razini vode kako bi se pomoglo u definiranju karata za bolje razumijevanje tokova podzemne vode (Johnson, 2009).

Postoji nekoliko metoda kao što su geološke, hidrogeološke, geofizičke i daljinske (engl. *Remote sensing*) tehnike istraživanja, koje se mogu primijeniti za određivanje potencijalne zone prihranjivanja podzemne vode. Mnogi čimbenici utječu na pojavu i kretanje podzemnih voda u regiji, uključujući: topografiju, litologiju, geološke strukture, dubinu slojeva, primarnu poroznost, sekundarnu poroznost, nagib, drenažne uzorke, zemljište, kopnene površine. Istraživanja u hidrogeologiji i geofizici na licu mjesta pomažu objasniti procese prihranjivanja podzemnih voda u vodonosnike i procjenjuju prostorno-vremenske razlike u istraživanjima. Međutim, ove metode se često usredotočuju na jedan faktor koji utječe te na neizravni pokus na specifičnoj lokaciji za prihranjivanje podzemnih voda, čime se smanjuje pouzdanost objašnjenja. Nedavno su daljinska istraživanja ušla sve više u upotrebu kako bi se zamijenilo istraživanje na licu mjesta istraživanja. Tehnike daljinskih istraživanja omogućuju poboljšanu karakterizaciju površine zemljišta, koje se primjenjuju na sve veći broj hidrogeoloških istraživanja. Daljinska istraživanja ne samo da pružaju širok raspon prostorno-vremenske raspodjele promatranja, već i štede vrijeme i novac (Yeh i sur., 2015).

Tehnologija daljinskog istraživanja, koristi se kako bi se identificirale geološke značajke, topografija i distribucija rijeka u regiji koja se razmatra. Osim toga, usvojene su baze podataka o iskorištenosti zemljišta, geološke karte i istraživanje na licu mjesta kako bi se kvantitativno i kvalitativno opisali hidrogeološki uvjeti područja. Različite podloge u tematskim kartama označene su odvojeno. Distribucija potencijalne zone prihranjivanja podzemne vode određena je koordinacijom s funkcijom integracije prostora GIS-a. Potencijalna zona prihranjivanja podzemnih voda procjenjuje se u različitim metodama u mnogim zemljama. Ovakve metode nam mogu pomoću u analizama određenog područja, a samim tim i pomoći kod određivanja zaštite podzemnih voda u budućnosti.

Kao jedno od mogućnosti primjene GIS-a, s obzirom na buduću primjenu u zaštiti aluvijalnih vodonosnika su i određene metode opisane na području Tajvana u dolini rijeke Hualian (Yeh i sur., 2015). U ovoj su studiji utvrđeni različiti čimbenici koji utječu na potencijalno prihranjivanje podzemnih voda. GIS pristup je korišten za integraciju pet faktora: litologije, korištenja zemljišta, nagiba zemljišta, površinskog otjecanja (dreniranja) te potencijal podzemnih voda (slika 24).



Slika 24. Područje istraživanja zajedno s prikazom glavnih GIS faktora (Tajvan, Yeh. i sur., 2015)

U prikazanom istraživanju je predložen integrirani pristup za procjenu karakteristika prihranjivanja podzemnih voda pomoću GIS tehnike. Ova je studija važna za održivo korištenje resursa podzemnih voda čime se poboljšava obnavljanje podzemnih voda odgovarajućim upravljanjem. Rezultati pokazuju da primjena GIS tehnika pomaže istraživanju podzemnih voda u sužavanju ciljnih područja za provođenje detaljnih hidrogeoloških istraživanja na terenu. U studiji su korištene satelitske slike za analizu dovršene digitalne karte i postavljanje odgovarajućih utjecajnih rezultata prema utjecajnim čimbenicima.

Litologija

Vrsta stijene izložene površini značajno utječe na prihranjivanje podzemnih voda. Litologija utječe na količinu podzemnih voda kontroliranjem infiltracije toka vode (El-Baz, 1995). Iako su neka istraživanja zanemarila ovaj faktor s obzirom na linije i drenažne tokove kao funkciju primarne i sekundarne poroznosti, ova studija uključuje litologiju kako bi se smanjila nesigurnost pri određivanju ostalih čimbenika.

Korištenje zemljišta

Uključuje vrstu naslaga tla, raspodjelu stambenih površina i pokrivenost vegetacijom. One se mogu interpretirati iz satelitskih slika i kopnenih karata. Znanje o korištenju zemljišta i kopnenom pokrovu potrebno je za kvantificiranje proračuna podzemne vode. Korištenje zemljišta utječe i na evapotranspiraciju, otjecanje kao i na prihranjivanje sustava podzemnih voda. Procjenjuje se razlika u količini prihranjivanja podzemnih voda zbog promjena korištenja zemljišta i vegetacije zavisno o promjeni razine podzemnih voda (Leduc i sur., 2001).

Otjecanje površinske vode

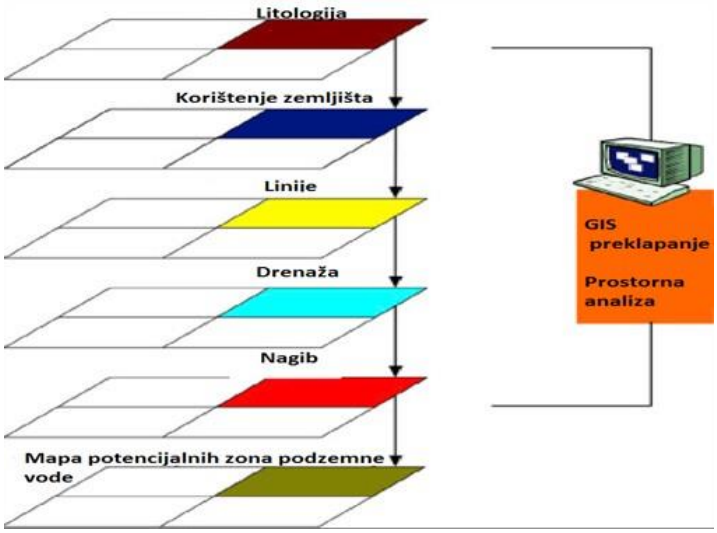
Svaka prirodna ili umjetna odvodnja vode s površine ili podzemne vode iz nekog područja predstavlja promjene u hidrološkom ciklusu. Kvaliteta drenažne mreže ovisi o geološkoj strukturi, koja daje tok i brzinu podzemne vode kroz porozni prostor te o vrsti materijala kroz koji voda prolazi (Greenbaum, 1985). Određivanje drenažne mreže u GIS-u može prikazati mjesta većih površinskih tokova na mjestima većih padina gdje je brža odvodnja prema kanalima ili rijekama. Može se odrediti odnos brzine infiltracije padalina u usporedbi s površinskim otjecanjem. Odnos infiltracijskog otjecanja kontrolira uglavnom permeabilnost koja ovisi o litologiji (Edet i sur., 1998).

Nagib

U mnogim studijama koje se odnose na protok i skladištenje podzemnih voda, nagib se često zanemaruje. Posebno u područjima s manje planinskim terenom. Međutim, kiša je glavni izvor prihranjivanja podzemnih voda u mnogim vodonosnicima (Al Saud, 2010), a gradijent nagiba izravno utječe na infiltraciju padalina. Funkcija analize nagiba u GIS-u koristi se za procjenu varijacije nagiba u istražnom bazenu pomoću podataka iz baze podataka Digital Terrain Model (DTM) odnosno digitalnog modela terena.

Kao konačni produkt preklapanjem svih 5 podloga i uz pomoć prostorne analize dobiva se pregledna karta potencijalnih zona prihranjivanja podzemnih voda pomoću GIS-a (slika 25). Karte i metode opisane u ovom poglavlju mogle bi se koristiti i za područje Republike Hrvatske kao pomoć kod zaštite podzemnih voda aluvijalnih vodonosnika.

Budući da se trenutno GIS u Hrvatskoj u okviru zakonske regulative koristi najčešće kao alat za prostorni prikaz određenih zona sanitarne zaštite, možda bi se mogao u budućnosti razmotriti GIS kao jedan od važnih alata za određivanje zona sanitarne zaštite. Što bi značilo da se koristi i za rješavanje određenih matematičkih modela (npr. MODFLOW) unutar GIS-a ili za grafičke prikaze (mape) za određene parametre kao što su npr. nagibi terena, količina oborina, geološka građa. Uz pomoć tih podloga dobiva se više opcija i mogućnosti za daljnja istraživanja i razumijevanja ponašanja podzemnih voda te mogućnost predviđanja odnosno simulacije pronosa onečišćenja ukoliko do njega dođe. Ti postupci su vrlo bitni da se što točnije i sigurnije odrede zone sanitarne zaštite koje omogućuju da eksploatirana voda bude što čišća i očuvana za buduće generacije.



Slika 25. Shematski prikaz preklapanja podloga i prostorne analize (Yeh i sur., 2015)

6 ZAKLJUČAK

Republika Hrvatska je što se tiče vodnih resursa jedna od bogatijih država u Europi, a što je još važnije, velika većina izvora i zdenaca koji se koriste za vodoopskrbu pitke vode su vrlo dobre kvalitete. Aluvijalni vodonosnici u dravskom i savskom bazenu bogati su vodom i predstavljaju glavni vodoopskrbni resurs sjevernog dijela Hrvatske. Aluvijalni vodonosnici se najčešće nalaze na područjima koja su izrazito pogodna za poljoprivredne djelatnosti i utočište su mnogih većih gradova.

Zbog toga su vrlo ranjivi, što onečišćujućim tvarima iz industrija i poljoprivrede, što zbog opasnosti od prevelike eksploatacije pitke vode. Pozitivna strana je što su aluvijalni vodonosnici sposobni površinsku vodu kroz nezasićenu zonu u određenoj mjeri „pročistiti“, odnosno smanjiti utjecaj onečišćivala ukoliko ono dođe u podzemlje. Za njihovu zaštitu je bitno utvrditi tok i vrijeme dotoka podzemne vode prema zdencima i na temelju toga odrediti zone sanitarne zaštite.

U Hrvatskoj se zaštita podzemnih voda provodi prema zakonima i pravilnicima te određenim propisima koje je Republika Hrvatska preuzela kao obvezu prilikom ulaska u EU. Međutim i ranijih godina se Republika Hrvatska pridržavala striktnih pravila što se tiče zaštite izvorišta i podzemnih voda u cjelini. U toj zaštiti vrlo bitnu i sve veću ulogu ima GIS, koji omogućuje vizualizaciju, pitanja, analizu i tumačenje podataka kako bi bolje razumjeli odnose, obrasce i trendove u prostoru.

Trenutno je u Hrvatskoj temeljni zadatak korištenja GIS-a u zaštiti podzemnih voda prostorni prikaz zona sanitarnih zaštita te alat za izrade karata prirodne ranjivosti naročito kod krških vodonosnika. Također se i koristi za izradu karata opasnosti i rizika, najčešće za krške vodonosnike. Što se tiče aluvijalnih vodonosnika napravljena je karta prirodne ranjivosti temeljem SINTACS metode, kao podloga za analizu pritisaka i utjecaja (IMPRESS analiza) prilikom ocjene stanja podzemnih voda u panonskom dijelu Hrvatske (Brkić i sur., 2009). GIS se uglavnom jako malo koristi kao alat za kompliciranije analize i određene simulacije kao što je npr. implementacije MODFLOW-a u GIS kao pomoć kod određivanja zona sanitarne zaštite.

U ovom radu navedeno je više mogućnosti GIS-a te njegove prednosti. Zbog svoje rasprostranjenosti ne samo u hidrogeološkim istraživanjima već i u svakodnevnom korištenju, GIS se predstavlja kao jedan od glavnih alata kod određivanja zona sanitarne zaštite. Također je navedeno nekoliko primjera gdje se pomoću GIS-a olakšava razumijevanje pojedinih procesa u podzemlju. Zbog svih nabrojanih prednosti, velike su mogućnosti korištenja GIS-a u zaštiti vodnih resursa. Uz prostorne analize, koje su nezamislive bez GIS tehnologije, mogao bi se koristiti i za izradu kompliciranijih modela koji bi omogućili preciznije ocjene stanja i kretanja podzemnih voda.

7 LITERATURA

Al Saud, M. (2010). *Mapping potential areas for groundwater storage in Wadi Aurnah Basin, western Arabian Peninsula, using remote sensing and geographic information system techniques*. Hydrogeol J,18, 1481-1495.

Aquaveo (2016). Arc Hydro Groundwater. *MODFLOW Analyst*. [Online]. Dostupno na: http://www.aquaveo.com/software/ahgw-modflow-analyst [10.08.2017]

Bačani, A. (2006). *Hidrogeologija 1*. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 36-50.

Bačani, A., Posavec, K. (2008). *Elaborat o zaštitnim zonama izvorišta Velika, Gorica, Strmec, Šibice, Bregana i Slapnica*. Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.

Bear, J. (1972). *Dynamics of Fluids in Porous Media*. New York: American Elsevier

Biondić, R. (2010). *Uvod u GIS (Geografski informacijski sustav).* Skripta iz kolegija Geografski informacijski sustav. Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, 114 str.

Brink, C., Wuijts, S. (2016). *Towards an effective protection of groundwater resources: putting policy into practice with the drinking water protection file*; Water Policy 18. p. 645

Brkić, Ž., Biondić, R., Kapelj, J., Kapelj, S. & Marković, T. (2005): *Karakterizacija vodnih cjelina na Crnomorskom slivu u okviru implementacije Okvirne direktive o vodama*.- Arhiv Hrvatski geološki institut, Zagreb.

Brkić, Ž., Larva, O., Marković, T. (2009). *Ocjena stanja i rizika cjelina podzemnih voda u panonskom dijelu Republike Hrvatske*. Hrvatski geološki institut, Zagreb.

British Columbia Ministry of Environment. (2008). Township of Langley. *Water Management Plan*. Draft Report – 2nd Version. [Online]. Environment. Dostupno na: http://www.waterbucket.ca/okw/sites/wbcokw/documents/media/86.pdf [10.08.2017]

Civita, M., De Maio, M.(1997) - *SINTACS Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento, Metodologia e automazione,* Pitagora Ed., Bologna.

Council of Canadian Academies (2009). *The Sustainable Managmement of groudwater in Canada.* Report of the Expert Panel on Groundwater. [Online]. Dostupno na : http://www.scienceadvice.ca/uploacoucds/eng/assessments%20and%20publications%20and%20news%20releases/groundwater/(2009-05-11)%20gw%20report.pdf [12.05.2017]

Cramer, W., Verweij W., Wuijts, S. & Zijp, M. (2010). *Nitrate and the status of groundwater bodies. The Dutch experience*. 3rd European Groundwater Conference, Madrid.

Department of Water and Environmental Regulation. (2016). *Inset map of Perth north area*. Government of Western Australia. [Online]. Dostupno na: http://www.water.wa.gov.au/__data/assets/pdf_file/0014/9032/111060.pdf [29.08.2017]

Dimas, S. (2007). *Implementation report for the Water Framework Directive*. 1st European Water Conference. 22-23 March 2007. Bruxelles. Belgium

Direktiva o podzemnim vodama (DPV) 2006/118/EZ (2006). Direktiva Europskog parlamenta i Vijeća o zaštiti podzemnih voda od onečišćenja i pogoršanja kakvoće

Dufour, F. C. (2000*). Groundwater in the Netherlands–Facts and figures. Netherlands Institute of Applied Geoscience* TNO. National Geological Survey, Delft/Utrecht, The Netherlands.

Edet A. E., Okereke C. S., Teme S. C., Esu E. O. (1998): *Application of remote-sensing data to groundwater exploration: A case study of the Cross River State, southeastern Nigeria.* Hydrogeology Journal. Vol. 6 (3), 394–404.

El-Baz, F., Himida, I. (1995). *Groundwater Potential of the Sinai Peninsula*, US Agency for International Development, Cairo, Egypt.

Environment Canada. (2004). *Threats to Water Availability in Canada*. NWRI Scientific Assessment Report Series No. 3 and ACSD Science Assessment Series No. 1. Burlington. National Water Research Institute.

Environmental System Research Institute. (2001). *What is ArcGIS*. [Online]. Dostupno na: http://downloads.esri.com/support/documentation/ao_/698What_is_ArcGis.pdf [19.08.2017]

EPA US. (2016). Getting up to speed: *Proctecting ground water.* [Online]. Dostupno na: https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-08/documents/mgwc-gwd1.pdf [10.05.2017]

ESRI. (1992). *Understanding GIS*. Rev 6,Environmental Systems Research Institute-ESRI, Inc., Redlands, CA, USA.

Focazio, M. J., Reilly T. E., Rupert M. G., Helsel D. R. (2002). *Assessing Ground-Water Vulnerability to Contamination: Providing Scientifically Defensible Information for Decision Makers*. Reston, Virginia. U.S Geological Survey.

Geoportal Kanada. (2017). *Source Water Protection Atlas*. [Online]. Dostupno na: https://www.gisapplication.lrc.gov.on.ca/SourceWaterProtection/Index.html?site=SourceWaterProtection&viewer=SWPViewer&locale=en-US [29.08.2017]

Geoscience Australia (2009). Groundwater Quality in Australia and New Zealand: a literature review, Department of the Environment, Water, Heritage and the Arts, Canberra.

Greenbaum, D. (1985). *Review of remote sensing applications to groundwater exploration in basement and regolith*. British Geological Survey, Nottingham, UK.

Greene, R., Agbenowoshi N., Loganathan G. F. (1999). *GIS based approach to sewer system design*. J.Surveying Eng. 125 (1). 36–57.

Grizelj Šimić, V. (2014). *GIS i njegova primjena u hidrologiji i suvremenom vodnogospodarskom planiranju.* Hrvatske vode 22 (88), 119-130.

Harrington N., Cook P. (2014). *Groundwater in Australia*. Flinders University. National Centre for Groundwater Research and Training, Australia

Johnson, L. E. (2009). *GIS in water resources engineering*, Taylor & Francis Group, LLC, USA.

Laeven, M.P., Beekman W., Drogendijk L.J.L., P. van Bergen, C. van den Brink (1999). *Functieverweving en duurzame waterwinning (Defining the function risks for groundwater abstraction sites).* Nieuwegein. Netherlands

Lanfear, K.J. (2000). *The Future of GIS and Water Resources, Water Resources Impact, American Water Resources Association*, Vol.2, No.5, 9–11.

Leduc, C., Favreau, G., Schroeter, P. (2001). *Long-term rise in a Sahelian water-table: the Continental Terminal in south-west Niger.* J Hydrol, 243, 43-54.

Maidment, D. R. (2002). *Arc Hydro: Gis for Water Resources*. ESRI Press. California. USA.

McDonald, G. M., Harbaugh W. A., (1988). *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*. U.S. Geological Survey.

Meaški, H. (2016): *Materijali s predavanja iz kolegija Zaštita podzemnih voda u ak. godini 2016./2017*. Geotehnički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Varaždin.

Meinardi, C. M. (1994). *Groundwater recharge and travel times in the sandy regions of the Netherlands*.. National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), Bilthoven, The Netherlands.

Nakić, Z., Bačani A., Parlov J., Duić Ž., Perković D., Kovač Z., Tumara D., Mijatović I. (2016). *Definiranje trendova i ocjena stanja podzemnih voda na području panonskog dijela Hrvatske.* Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

Naghibi, S., Moghaddam, D. D., Kalantarc, B. Pradhanc, B., Kisie, O. (2016*). A comparative assessment of GIS-based data mining models and a novel ensemble model in groundwater well potential mapping*. Journal of Hydrology, Volume 548, 471–483.

National Water Quality Management Strategy. (2013). *Guidelines for Groundwater Quality Protection in Australia*. [Online]. Dostupno na: http://www.agriculture.gov.au/SiteCollectionDocuments/water/groundwater-quality-protection.pdf [29.08.2017]

Nowlan, L. (2005). Buried Treasure: *Groundwater Permitting and Pricing in Canada*. Walter and Duncan Gordon Foundation. Toronto

OECD. (1999). *The Price of water: Trends in OECD countries*. Paris, France: Organisation for Economic Cooperation and Development.

Okvirna direktiva o vodama (ODV) 2000/60/EC (2000): Water Framework Directive of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of water policy.

Plan upravljanja vodnim područjima (PUVP) za razdoblje 2016. – 2021. (2016), Hrvatske vode. Odluka o donošenju plana upravljanja vodnim područjima. Narodne novine. Broj 66 [6.7.2016.]

Posavec, K., Bačani, A. i Nakić, Z. (2013.): *Analiza utjecaja višenamjenskog hidrotehničkog sustava uređenja, zaštite i korištenja rijeke Save od granice s Republikom*

Slovenijom do Siska (Koncept sustava) na podzemne vode zagrebačkog i samoborskog vodonosnika. Fond dokumentacije tvrtke Elektroprojekt d.d., Zagreb.

Pravilnik o izmjenama Pravilnika o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta (2013). Narodne novine. Broj 47 [11.4.2013]

Pravilnik o uvjetima za utvrđivanje zona sanitarne zaštite izvorišta (2011). Narodne novine. Broj 66. [27.5.2011.]

Rindahl, B. (1996). *Analysis of real-time raingage and streamgage flood data using ArcView 3.0*. ESRI User's Conference. San Diego, California.

Rossman, L. A. (2007). *Storm water management model user's manual*, version 5.0. Cincinnati, Ohio. National Risk Management Research Laboratory. Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency.

Shamsi, U. M. (2005). *GIS Applications for Water, Wastewater, and Stormwater Systems*. CRC Press, 2000 N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida

Source Protection Region (2007). *The Four Vulnerable Areas*. Newmarket. Kanada. [Online]. Dostupno na: http://www.ourwatershed.ca/sgb/vulnerable_areas.php [03.06.2017]

Statistics Canada. (2005*). Population Projections for Canada, Provinces, and Territories: Highlights*. [Online]. Dostupno na: http://www.statcan.gc.ca/pub/91-520-x/00105/4095095-eng.htm [10.08.2017]

Strategija upravljanja vodama. (2008). Hrvatske vode. Narodne novine. Broj 91 [15.07.2008]

Sundaram B., Coram, J. (2009). *Groundwater Quality in Australia and New Zealand: a literature review, report prepared*. Department of the Environment, Water, Heritage and the Arts, Canberra**.**

SWPP. (2006). First Nations On-Reserve Source Water Protection Plan. Ontario, Canada. [Online]. Dostupno na: https://www.aadnc-aandc.gc.ca/DAM/DAM-INTER-HQ-ENR/STAGING/texte-text/source_1398366907537_eng.pdf [27.05.2017]

U.S. Government Accountability Office. (2012). *Geospatial Information* [Online]. Dostupno na: http://www.gao.gov/assets/660/650293.pdf 2012 [31.05.2017]

Vewin. *Dutch DrinkingWater Statistics 2008*. Nizozemska [Online]. Dostupno na: http://www.vewin.nl/SiteCollectionDocuments/Publicaties/English%20_publications/Vewin_Dutch_Drinking_water_statistics_2012.pdf [10.05.2017]

Wuijts, S. (2013). *Policy measures to protect resources for drinking water: how to monitor effectivity and efficiency*. In: Proceedings IAH Conference Niagara, 17–21, Ontario, Canada.

Yeh Hsin-Fu, Youg-Sin Cheng, Hung-I.Lin, Cheng-Haw Lee. (2015). *Mapping groundwater recharge potential zone using a GIS approach in Hualian River, Taiwan*. Department of Resources Engineering, National Cheng Kung University. Tainan, Taiwan.

Zakon o vodama. Narodne novine. Broj 153/09, 63/11, 130/11, 56/13, 14/14. [Online]. Dostupno na: https://www.zakon.hr/z/124/Zakon-o-vodama [29.08.2017]

POPIS SLIKA

Slika 1. Tipovi vodonosnih slojeva (Bear, 1972) 4
Slika 2. Raspodjela vode u podzemlju (Bear, 1972)..... 5
Slika 3. Prisutnost ili odsutnost stvarnih ili mogućih onečišćujućih tvari u površinskim i podzemnim vodama (Laeven, i sur., 1999) 13
Slika 4. Rezultati analize rizika cjelina podzemnih voda u pokrajini Drenthe (Laeven i sur., 1999) 14
Slika 5. Klasifikacija provedbe mjera zaštite podzemnih voda (Focazio i sur., 2002)... 14
Slika 6. Karta resursa podzemnih voda Australije (Harrington i Cook, 2014)..... 15
Slika 7. Područje zaštite podzemnih voda i zdenaca (lijevo) i primjer zaštitnog područja P3 (desno) (Department of Water and Environmental Regulation, Government of Western Australia, 2016) 19
Slika 8. Pentagon za održivo upravljanje podzemnim vodama (Council of Canadian Academies, 2009) 21
Slika 9. Hidrogram pokazuje razinu vode u zdencu br.7 za vodoopskrbu grada Langley (British Columbia Ministry of Environment, 2008) 21
Slika 10. Proces plana zaštite voda u Kanadi (SWPP, Kanada, 2006) 22
Slika 11. Područje zaštite podzemnih voda (lijevo) i zone zaštite podzemne vode (desno) (SWPP, Kanada, 2006) 23
Slika 12. Karta ranjivosti oko zdenca za eksploataciju podzemnih voda (Source Protection Region, Newmarket, Canada, 2007) 25
Slika 13. Zone sanitarne zaštite na primjeru vodocrpilišta Nedelišće (Bačani i Posavec, 2007) 28
Slika 14. Princip preklapanja slojeva (U.S. Government Accountability Office, 2012) 30
Slika 15. Karta nadmorske visine (a) i karta nagiba (b) (Naghibi i sur., 2016)..... 32
Slika 16. Karte moguće raspoloživosti količina podzemnih voda dobivene: AdaBoost, Bagging, GAM i NB i FREM modelima (Naghibi i sur., 2016) 33
Slika 17. Prikaz zaštitnih zona koristeći GIS alate (Geoportal Kanada, Ontario, 2017) 36
Slika 18. Simulirane trase za visoke vode (lijevo) i horizontalna diskretizacija modela (desno) (Bačani i Posavec, 2008) 37
Slika 19. Primjer upravljanja MODFLOW modelom unutar ArcGis-a (Aquaveo, 2016) 38

Slika 20. SINTACS – kategorizacija prema normaliziranom indeksu ranjivosti vodonosnika (Civita i De Maio, 1997) 41
Slika 21. Karta prirodne ranjivosti vodonosnika (Brkić i sur., 2009) 42
Slika 22. Razvoj GIS projekta (ESRI, 1992) 43
Slika 23. Stvaranje GIS aplikacijskog sustava (ESRI, 1992) 44
Slika 24. Područje istraživanja zajedno s prikazom glavnih GIS faktora (Tajvan, Yeh. i sur., 2015) 46
Slika 25. Shematski prikaz preklapanja podloga i prostorne analize (Yeh i sur., 2015) 48

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vjerojatnost onečišćenja (SWPP, Kanada, 2006) 24
Tablica 2. Matrica analize rezultata procjene rizika (SWPP, Kanada, 2006) 24
Tablica 3. Kriteriji zaštite aluvijalnih vodonosnika (NN 66/2011, NN 47/2013) 28