

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



*PODIPLOMSKI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
HIDROTEHNIČNA SMER*

DOKTORSKI ŠTUDIJ

Kandidat:

Mag. LEON GOSAR, univ. dipl. inž. grad.

UMEŠČANJE MODELOV VODNIH SISTEMOV V NAVIDEZNO OKOLJE

Doktorska disertacija števil.: 187

WATER SYSTEM MODELS IN VIRTUAL ENVIRONMENT

Doctoral thesis No.: 187

Temo doktorske disertacije je odobril Senata Univerze v Ljubljani na svoji 22. seji
dne 30. junija 2004 in imenovala
mentorja prof.dr. Franca Steinmana in
somentorja doc.dr. Primoža Banovca.

Ljubljana, 10. oktober 2008

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Komisijo za oceno ustreznosti teme doktorske disertacije v sestavi
prof.dr. Franc Steinman,
doc.dr. Primož Banovec,
izr.prof.dr. Boris Kompare,
prof.dr. Žiga Turk,
prof.dr. Jure Margeta, Sveučilište v Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet.
je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 5. redni seji dne
26. novembra 2003.

Komisijo za oceno doktorske disertacije v sestavi
prof.dr. Franc Steinman,
izr.prof.dr. Boris Kompare,
prof.dr. Žiga Turk,
doc.dr. Dušan Petrovič,
prof.dr. Jure Margeta, Sveučilište v Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet.
je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 19. redni seji dne
02. julija 2008.

Komisijo za zagovor doktorske disertacije v sestavi
prof. dr. Bojan Majes, dekan, predsednik
prof.dr. Franc Steinman,
doc.dr. Primož Banovec,
izr.prof.dr. Boris Kompare,
prof.dr. Žiga Turk,
doc.dr. Dušan Petrovič
prof.dr. Jure Margeta, Sveučilište v Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet.
je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo na 20. redni seji dne
24. septembra 2008.

Patriciji, Eneju, Tanji
Eneju, Tanji, Patriciji
Tanji, Patriciji, Eneju

*Realnost je zgolj iluzija,
vendar zelo obstojna.*

Albert Einstein

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **mag. Leon Gosar, univ.dipl.inž.gradb.** izjavljam, da sem avtor doktorske disertacije z naslovom:

"UMEŠČANJE MODELOV VODNIH SISTEMOV V NAVIDEZNO OKOLJE".

Ljubljana, 10. oktober 2008

Leon Gosar

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	519.61/.64:556+626/628.1(043.3)
Avtor:	mag. Leon Gosar, univ.dipl.inž.gradb.
Mentor:	red.prof. dr. Franc Steinman
Somentor:	doc.dr. Primož Banovec
Naslov:	Umeščanje modelov vodnih sistemov v navidežno okolje
Obseg in oprema:	165 str., 2 pregl., 63 sl., 24 en., 2 pril.
Ključne besede:	vodni sistem, prostorski podatki, navidežno okolje, vodno telo, 3R modeliranje

Izvleček

Elemente vodnih sistemov ne moremo prikazovati s prostorskimi podatki, ki predstavljajo konstantno geometrijo. Trirazsežna abstrakcija, skozi katero lahko pregledujemo prostorske podatke o vodnih telesih, je sestavljena iz dinamičnih struktur s kompleksno geometrijo in topologijo. Trirazsežna upodobitev površin ne zadošča pomenskimi opredelitvam posameznih elementov prostora, v katerega se vključujejo vodni sistemi.

Pravila oblikovanja vodnogospodarskih vsebin na kartah so nastajala desetletja. Z razvojem novih informacijskih tehnologij upravljanja s prostorskimi podatki in zmožnostmi prikazovanja (3R GIS in navidezna resničnost) pa je treba tudi za vodnogospodarske vsebine izdelati vizualni in vsebinski preskok umeščanja vodnih sistemov v informacijska okolja. Doktorska disertacija obravnava načela umeščanja elementov vodnih sistemov v navideznem okolju in podaja načine pomenskega opredeljevanja elementov vodnih sistemov v trirazsežnem okolju.

Opredeljen je pojem modela vodnega sistema in navideznega okolja, kot univerzalnega trirazsežnega okolja, izdelanega z informacijsko tehnologijo, ki omogoča obravnavo novih razsežnosti vodnih sistemov (npr. realistična upodobitev, čas, ipd.). Ključne opredelitve izhajajo iz matematičnih in fizičnih modelov vodnih sistemov, saj naj bi se v navideznem okolju podatki o stanju vodnih sistemov in rezultati modeliranja združevali v enotnem okolju.

Z metodo razvrščanja vodnih sistemov po objektnih tipih so podrobneje analizirani elementi vodnih pojavov v trirazsežnem prostoru, nato pa opredeljen bistveni element vodnih pojavov v navideznem okolju – vodno telo. Vodnogospodarski objekti, naprave, ureditve in pravni režimi so analizirani kot grajeno okolje, pri katerem so geometrijske lastnosti določene.

Rešitve so preizkušene na praktičnih primerih v navideznem okolju morja, rečnega območja in za dinamiko zaporničnih elementov. Poudarek v doktorski disertaciji je na določitvi vsebine elementov vodnih sistemov in ne na tehnološki rešitvi.

BIBLIOGRAPHIC-DOKUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: **519.61/.64:556+626/628.1(043.3)**

Author: **M.Sc. Leon Gosar**

Supervisor: **Prof. Dr. Franc Steinman**

Co-supervisor: **Assist.Prof.Dr. Primož Banovec**

Title: **Water system models in virtual environment**

Notes: **165 p., 2 tab., 63 fig., 24 eq., 2 ann.**

Key words: **water system, spatial data, virtual environment, water body,
3D modelling**

Abstract

The water system elements can not be illustrated with spatial data with constant geometry. A three-dimensional abstraction, through which spatial data on water bodies can be examined, is composed of dynamic structures with complex geometry and topology. A three-dimensional visualisation of surfaces does not suffice to define the meaning of individual elements of space in which water bodies are included.

Maps rules for water management contents have been drawn for decades. Due to the development of new information technologies for spatial data management and to possibilities of presentation (3D GIS and virtual reality), it is necessary to make a visual and material shift with placing water systems into information environments also as regards water management contents. The thesis deals with the principles of placing water system elements in virtual environment and presents the methods of defining the meaning of water system elements in three-dimensional environment.

It defines the notion of a water system model and virtual environment as universal three-dimensional environment created with information technology which allows treatment of new dimensions of water systems (e.g. realistic presentation, time, etc.). Key definitions are derived from mathematical and physical models of water systems, since in virtual environment the data on water system situation and the results of modelling should be union in the same environment.

Using the method of classifying waters systems by object types, elements of water phenomena are analysed in more detail in three-dimensional space, then an essential element of water phenomena is defined in virtual environment – water body. Water management facilities, installations, arrangements and legal systems are analysed as built environment with defined geometrical properties.

The solutions are tested on practical examples in virtual environment of a part of the sea, river section and dynamics of gate elements. The thesis gives emphasis on the determination of contents of water system elements and not on the technological solution.

ZAHVALA

Iz srca se zahvaljujem vsem, ki so mi pri nastajanju in izdelavi doktorske disertacije stali ob strani, me spodbujali in pomagali z nasveti. Posebej se za nasvete in strokovno pomoč zahvaljujem mentorju prof.dr. Franciju Steinmanu.

Lepa hvala sodelavcem za nesebično podporo, posebno Gašperju, Nejcu, Alešu in Iztoku.

Vso hvaležnost in ljubezen pa *Tanji*, za skrbno lektoriranje in transformacijo moje mnogo-razsežnosti v še obvladljivo število razsežnih stanj.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	PREGLED LITERATURE	6
2.1	Predhodno delo in stanje tehnike	6
2.2	Predhodno delo in stanje tehnike v Sloveniji	11
3	PREDSTAVITEV HIPOTEZE	14
3.1	Teoretična izhodišča modelov vodnih sistemov v navideznem okolju.....	14
3.2	Razvoj konceptualnega modela umeščanja elementov vodnih sistemov v navideznem okolju in testiranje modela	15
3.3	Raziskovalni cilji obravnavane teze	17
3.4	Organizacija raziskovanja	20
4	TEORETIČNA PODLAGA IN STRUKTURA RAZISKOVANJA.....	22
4.1	Model vodnega sistema in navidezno okolje	22
4.1.1	Odnosi med modelom in originalom	22
4.1.2	Metodologija sistemskega pristopa	27
4.1.3	Vodni sistem	32
4.1.4	Navidezno okolje	36
4.2	Koncept navidezne resničnosti	39
4.3	Tehnologije prikazovanja	42
4.4	Uporabniške potrebe pri delu z navideznimi okolji	45
4.5	Vodnogospodarske karte in načrti.....	46
4.6	Modeli vodnih sistemov v trirazsežnem prostoru: problemska področja.....	49
4.7	Faze hidravličnega modeliranja	51
4.7.1	Podatki in informacije	53
4.7.2	Izbira primerne modela	55
4.7.2.1	Fizični hidravlični modeli.....	56
4.7.2.2	Matematični hidravlični modeli.....	66

4.7.2.3	Primerjava fizičnih in matematičnih hidravličnih modelov.....	72
4.7.3	Umerjanje.....	73
4.7.4	Viri napak v hidravličnem modeliranju	76
5	METODOLOŠKA IZHODIŠČA ZA MODELIRANJE VODNIH SISTEMOV V	
	NAVIDEZNEM OKOLJU	78
5.1	Upodobitev objektov v trirazsežnem prostoru.....	78
5.2	Tehnologija prikazovanja objektov trirazsežnega prostora	79
5.2.1	Žično-okvirni pristop	79
5.2.2	Akumulativno modeliranje	80
5.2.3	Proizvodno modeliranje	82
5.3	Osnovne sestavine topologije trirazsežnega modela	83
5.4	Generalizacija trirazsežnih objektov	85
5.5	Modeliranje vodnih sistemov v navideznem okolju.....	87
5.6	Ponazoritev vodnih sistemov v navideznem okolju	89
5.6.1	Trirazsežnost vodnih sistemov	89
5.6.2	Časovna spremenljivost in povezanost vodnih sistemov	90
5.6.3	Prostorska povezanost elementov vodnih sistemov	91
5.6.4	Lastnosti elementov vodnega sistema v trirazsežnem prostoru	91
6	KONCEPTUALNI MODEL VODNIH SISTEMOV V NAVIDEZNEM	
	OKOLJU	93
6.1	Geometrijske lastnosti elementov navideznega okolja	93
6.1.1	Zemeljsko površje	94
6.1.2	Trirazsežne zgradbe, naprave in ureditve	94
6.1.3	Vodni pojavi.....	98
6.2	Podatkovna struktura elementov vodnih sistemov	100
6.2.1	Objektni tipi vodnih sistemov v navideznem okolju	101
6.2.2	Podporne vsebine modelov vodnih sistemov v navideznem okolju	103
6.3	Analiza elementov vodnih sistemov v trirazsežnem prostoru.....	105
6.3.1	Izhodišča	105
6.3.2	Vodni pojavi.....	107

6.3.2.1	Tekoče vode.....	109
6.3.2.2	Stoječe vode.....	114
6.3.2.3	Podzemne vode.....	116
6.3.2.4	Morje	118
6.3.2.5	Razpršeni površinski odtok	120
6.3.2.6	Sinteza elementov vodnih pojavov v modelu vodnih sistemov	122
6.3.3	Vodni objekti	124
7	PRIKAZ UPORABE MODELOV VODNIH SISTEMOV V NAVIDEZNEM OKOLJU	132
7.1	Upodobitev modelov vodnih sistemov v navideznem okolju	133
7.2	Ugotavljanje skladnosti med izmerjenimi in modeliranimi podatki v navideznem okolju.....	137
7.3	Dinamični elementi modelov vodnih sistemov v navideznem okolju.....	142
8	ZAKLJUČKI IN SKLEPI	146
8.1	Pregled in prikaz teze	146
8.2	Potrditev teze in njena uporabnost	148
8.3	Sinteza ugotovitev	150
8.4	Izzivi: Raziskave in razvoj	151
9	POVZETEK.....	154
10	SUMMARY	156
VIRI		158
PRILOGE.....		167

KAZALO PRILOG

PRILOGA A: Standard za prikaz vodnogospodarskih vsebin v kartah in načrtih DIN 2425

PRILOGA B: Simulacija obratovanja zaporničnih elementov HE Vrhovo

KAZALO SLIK

Slika 1: Trirazsežna upodobitev prostorskih podatkov.	2
Slika 2: Prikaz 3R geometrije in gladine z zaporednimi prečnimi prerezi, uporabljen v hidravličnem modelu HEC-RAS, na primeru reke Save pri Krškem.	6
Slika 3: Prikaz Nebotičnika v Ljubljani.	8
Slika 4: Realističen prikaz lesene kocke v vodi, položene na dno.	9
Slika 5: Interaktivna upodobitev poplavnih površin z orodjem navidezne resničnosti Responsive Workbench.	10
Slika 6: V navidezno okolje umeščen umetni otok ob Izoli.	11
Slika 7: Prikaz trirazsežnih kartografskih znakov vodnih objektov: vodohran, kot grajeni objekt (levo) in izvir, kot vodni pojav (desno).	12
Slika 8: Vizualna simulacija bodoče hidroelektrarne HE Krško.	13
Slika 9: Prikaz pravnih režimov R Slovenije na tematski karti in v navideznem okolju.	15
Slika 10: Prikaz odseka vodotoka v dvorazsežnem (levo) in trirazsežnem okolju (desno).	17
Slika 11: Model jezua na Dravinji pri Slapah (pod gladino vode je viden talni izpust).	18
Slika 12: Model tipskega jaška na AC Lenart - Cogetinci.	19
Slika 13: Klasifikacija modelov.	24
Slika 14: Modeliranje realnega in novega sistema.	26
Slika 15: Potek procesa modeliranja.	27
Slika 16: Vennov diagram klasifikacije sistema po bistvu.	29
Slika 17: Klasifikacija sistemov po nastanku, bistvu in ciljih.	31
Slika 18: Mnogo funkcijski sistemski pristop rabe vodnega rezervoarja.	33
Slika 19: Sistem gospodarjenja z vodo.	34
Slika 20: Sestavine vodnega sistema.	35
Slika 21: HE Moste – prikaz pomembnejših elementov grajenega vodnega sistema.	36
Slika 22: Opredelitev navideznega okolja.	37
Slika 23: Osnovna načela in potek procesa modeliranja na tipskem in pojavnem nivoju.	38
Slika 24: CAVE sistem navidezne resničnosti.	41
Slika 25: Prikaz vodnega stolpa v Mariboru v VRML.	42
Slika 26: Izvoz prostorskih podatkov Agencije RS za okolje v formatu GML.	44
Slika 27: Pojemovni model vodnega sistema.	50
Slika 28: Ciklični pristop hidravličnega modeliranja.	52
Slika 29: Primer postopka testiranja hidravličnega modela.	74
Slika 30: Proces dvostopenjskega umerjanja.	76
Slika 31: Primer skeletnega modela pregrade.	80
Slika 32: Primer akumulativnega modela pregrade.	81
Slika 33: Osnovni CSG gradniki (levo) in primer proizvodnega modeliranja (desno).	82
Slika 34: Nivoji generalizacije na primeru ločne pregrade.	86
Slika 35: Fotografija izvira v Vevčanih, Makedonija – povezava podzemne vode in površinske vode.	89
Slika 36: Vodni krog.	90

Slika 37: Modeliranje realnosti, od vseobsežnosti realnega sveta do uporabniškega, fizičnega modela realnega sveta.	93
Slika 38: Trirazsežnost zemeljskega površja.	94
Slika 39: Fraktalni točkovni element – grmičevje (levo) in linijski elementi – cevi (desno).	95
Slika 40: Ploskovni elementi – pasovi obale.	96
Slika 41: Volumski elementi – oblaki različnih koncentracij naftnih derivatov v primeru nesreče na morju (zgoraj: prikaz na karti, spodaj: prikaz v navideznem okolju).	97
Slika 42: Prikaz gladine vode modelirane z 1R matematičnim modelom.	100
Slika 43: Prikaz različnih realističnih upodobitev gladine vode.	100
Slika 44: Shema razvrščanja elementov vodnih sistemov.	106
Slika 45: Karta vodnega in priobalnega zemljišča ob Obrtni coni Predstruge.	108
Slika 46: Metodologija abstrakcije modela prostora na dvorazsežni prostor GIS sistemov.	109
Slika 47: Osnovne značilnosti vodnega režima.	110
Slika 48: Elementi tekočih voda, prikazani v prerezu vodnega telesa (vodotok v desni krivini).	111
Slika 49: Elementi stoječih voda prikazani v prerezu vodnega telesa.	114
Slika 50: Elementi podzemnih voda prikazani v prerezu vodnih teles.	116
Slika 51: Prerez skozi elemente morja v trirazsežnem prostoru.	118
Slika 52: Prerez skozi elemente razpršenega površinskega odtoka.	121
Slika 53: Tehnologije zajema podatkov o vodnih objektih.	126
Slika 54: Osnovni in dodatni elementi modela rečne pregrade.	127
Slika 55: Simulacija delovanja zaporničnih elementov HE Vrhovo (levo: zaprte zapornice, desno: odprte zapornice).	128
Slika 56: Shematski prikaz vodomerne postaje.	130
Slika 57: Raba morja v Koprskem zalivu na primeru marikulture, kopalnih voda in zavarovanih območij ohranjanja narave.	135
Slika 58: Raba morja ob Debelem rtiču.	136
Slika 59: Model vodnega telesa pri pretoku Q_{100} (levo) in Q_{500} (desno).	139
Slika 60: Model vodnega telesa pri pretoku Q_{100} in model vodnega zemljišča, kot izpeljanega elementa.	140
Slika 61: Ujemanje med izmerjenimi in modeliranimi gladinami.	141
Slika 62: Shema prelivnega polja.	143
Slika 63: Simulacija obratovanja zaporničnih elementov prelivnih polj HE Vrhovo.	144

LIST OF FIGURES

Fig. 1: Three dimensional visualization of spatial data.....	2
Fig. 2: Three dimensional presentation of cross section geometry and water surface, used in hydraulic model HEC-RAS at river Sava near Krško.....	6
Fig. 3: Nebotičnik in Ljubljana.....	8
Fig. 4: Realistic presentation of wooden box in water, set on bottom.....	9
Fig. 5: Interactive visualization of flooded areas with virtual reality tool Responsive Workbench.....	10
Fig. 6: Artificial island in front of Izola in virtual environment.....	11
Fig. 7: Three dimensional cartographic presentation of water objects: drinking water reservoir (left) and water spring (right).....	12
Fig. 8: Visualization of HPP Krško.....	13
Fig. 9: Legal regimes of Republic of Slovenia on thematic map and in virtual environment.....	15
Fig. 10: Presentation of stream in 2D (left) and 3D environment (right).....	17
Fig. 11: Barrage on Dravinja near Slape (under water surface is seen bottom outlet).....	18
Fig. 12: Model of rain shaft on highway Lenart – Cogetinci.....	19
Fig. 13: Classification of models.....	24
Fig. 14: Modelling of real and new system.....	26
Fig. 15: Process of modelling.....	27
Fig. 16: Venn's diagram of system classification by essence.....	29
Fig. 17: System classification by rise, essence and goals.....	31
Fig. 18: Multifunctional systemic approach using of reservoir.....	33
Fig. 19: Water management system.....	34
Fig. 20: Water system components.....	35
Fig. 21: Hydroelectric power station Moste – important elements of built water system.....	36
Fig. 22: Virtual environment determination.....	37
Fig. 23: Main principles and modelling process.....	38
Fig. 24: Virtual reality system CAVE.....	41
Fig. 25: VRML presentation of Water tower in Maribor.....	42
Fig. 26: Spatial data download of Agency of environment of RS in GML format.....	44
Fig. 27: Comprehension model of water system.....	50
Fig. 28: Hydraulic modelling cycle.....	52
Fig. 29: Hydraulic model testing procedure.....	74
Fig. 30: Two level calibration procedure.....	76
Fig. 31: Wireframe model of dam.....	80
Fig. 32: Boundary representation model of dam.....	81
Fig. 33: CSG primitives (left) and sample of CSG modelling (right).....	82
Fig. 34: Level of generalization in the case of arch dam.....	86
Fig. 35: Photo of spring in Vevčani, Macedonia – connection of underground and surface water.....	89
Fig. 36: Water cycle.....	90
Fig. 37: Modelling of reality, from real word to model of real word.....	93

Fig. 38: Three dimensionality of earth surface.	94
Fig. 39: Shrubs presented by point element with fractals (left) and line elements – pipes (right).	95
Fig. 40: Surface elements - coast belts.	96
Fig. 41: Volume elements – different oil spill concentrations in sea (above: presentation in map, below: presentation in virtual environment).	97
Fig. 42: Water surface modelled with 1D mathematical model.	100
Fig. 43: Realistic presentation of water surface which emphasize dynamic of water body	100
Fig. 44: Classification of water system elements.	106
Fig. 45: Water and near water land near Obrtna cona Predstuge.	108
Fig. 46: Abstraction methodology of space in 2D GIS systems.	109
Fig. 47: Basic characteristics of water regime.	110
Fig. 48: Surface water (river) elements in cross section of water body (river in right curve).	111
Fig. 49: Surface water (lakes) elements in cross section of water body.	114
Fig. 50: Groundwater elements in cross section of water bodies.	116
Fig. 51: Marine water elements in cross section of water bodies.	118
Fig. 52: Section through catchment area elements.	121
Fig. 53: Water structures data gathering.	126
Fig. 54: Significant and supplementary elements of river barrage.	127
Fig. 55: Barrier operation simulation at HPP Vrhovo (left: barrier closed, right: barrier open).	128
Fig. 56: Schematic representation of gauging station.	130
Fig. 57: Marine area uses in Koper bay in the case of shellfish sites, bathing waters and nature preservation areas.	135
Fig. 58: Marine area uses near Debeli rtič.	136
Fig. 59: Water body model for Q_{100} (left) and Q_{500} (right) discharges.	139
Fig. 60: Water body model for Q_{100} and water plot model as take out element.	140
Fig. 61: Accordance between measured and modelled water level.	141
Fig. 62: Scheme of spillway.	143
Fig. 63: Simulation of HPP Vrhovo gates operation.	144

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Modelna merila.....	59
Preglednica 2: Pretvorniki med količinami v naravi in na modelu.	64

OZNAKE IN OKRAJŠAVE

1R (1D)	enorazsežno, enorazsežni, enorazsežne (enodimenzionalno, -i, -e)
2R (2D)	dvorazsežno, dvorazsežni, dvorazsežne (dvodimenzionalno, -i, -e)
2,5R (2,5D)	dvo in pol razsežno, dvo in pol razsežni, dvo in pol razsežne (dvo in pol dimenzionalno, -i, -e)
3R (3D)	trirazsežno, trirazsežni, trirazsežne (tridimenzionalno, -i, -e)
3R GIS	trirazsežni geografski informacijski sistem
3R CAD	trirazsežno računalniško podprto načrtovanje
B-Rep	akumulativno modeliranje
CAD	računalniško podprto načrtovanje
CSG	proizvodno modeliranje
D	Darcijev koeficient
DOF	digitalni ortofoto načrt
EU	Evropska unija
Eu	Eulerjevo število
Fr	Froudovo število
F_m	aktivna sila na modelu
F_n	aktivna sila v naravi
GIS	geografski informacijski sistem
GKB	generalizirana kartografska baza
GURS	Ministrstvo za okolje in prostor, Geodetska uprava RS
h	globina vode
I_0	energijski padec
I_x	padec dna v x smeri
I_y	padec dna v y smeri
$I_{0,x}$	padec dna v x smeri
$I_{0,y}$	padec dna v y smeri
L_m	dolžina na modelu

L_n	dolžina v naravi
L_m^z	višina na modelu
L_n^z	višina v naravi
MP	Ministrstvo za promet
NR	navidezna resničnost
p	tlak
R	hidravlični radij
Re	Reynoldsovo število
s	koordinata naravnega koordinatnega sistema, tangenta na os struge
TTN	temeljni topografski načrt
v	povprečna hitrost toka
v_m	hitrost na modelu
v_n	hitrost v naravi
v_x	komponenta hitrosti v x smeri
v_y	komponenta hitrosti v y smeri
v_z	komponenta hitrosti v z smeri
We	Webrovo število
t	čas
z	višinska kota
$\lambda_{x,y}$	geometrijsko linearno merilo modela za horizontalne razsežnosti
λ_z	geometrijsko linearno merilo modela za vertikalne razsežnosti
ρ	gostota tekočine

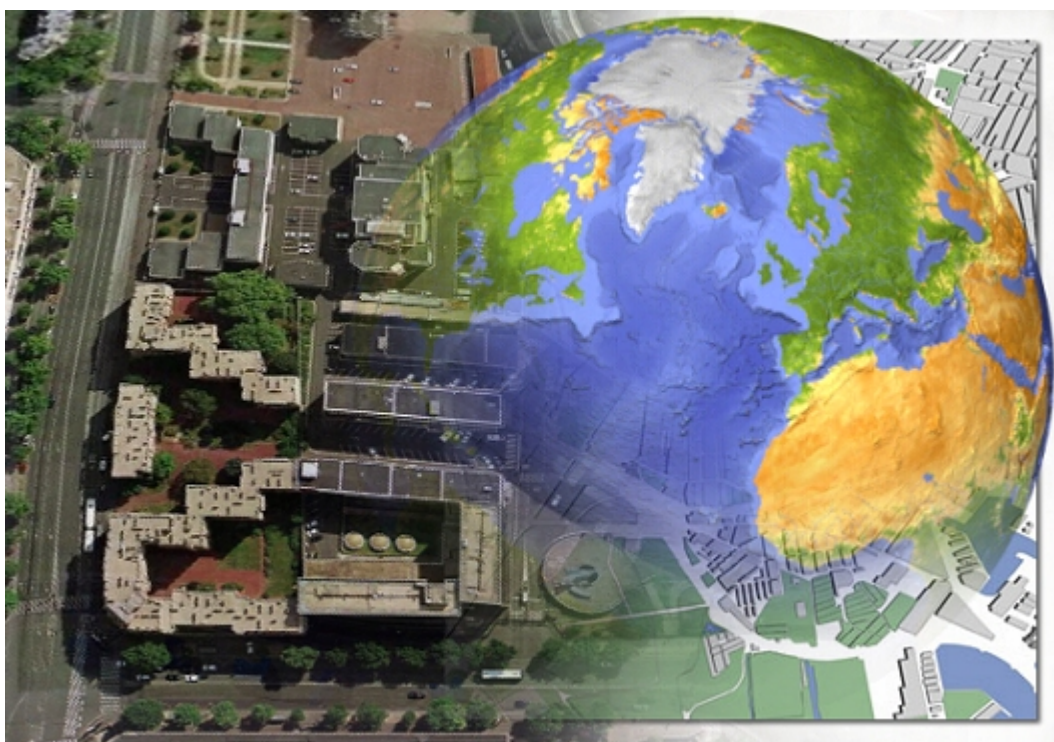
1 UVOD

Voda v vseh pojavnih oblikah predstavlja v celotnem razvoju človeštva enega izmed osnovnih elementov, ki so se ga ljudje bali, ga spoštovali, se mu prilagajali, ga prilagajali in nenazadnje nujno potrebovali za svoj obstoj. Večanje populacije in rast standarda bivanja neizogibno vodi k zahtevnosti obveznosti, ki morajo biti upoštevane pri gospodarjenju z vodami. To pa je možno le z rabo raznovrstnih informacij, ki morajo biti ustrezno obdelane in predstavljene. V veliko primerih je potreba po trirazsežnih informacijah ekstremno visoka. Na primer:

- večje zasebne ali javne gradnje - zadeve v zvezi z medsebojnim vplivanjem med novo načrtovanimi elementi (zgradbe, naprave, prometnice, ipd.) in obstoječimi ureditvami vodnega režima;
- ocena vplivov na okolje – analize in prikaz rezultatov modeliranja, kako vplivajo nove komunikacijske in transportne mreže, tovarne, ipd. na onesnaževanje vodnega okolja;
- rekreacija in turizem – primeren prikaz in gibanje v navideznem trirazsežnem prostoru;
- trg z nepremičninami – upravljanje lastništva nepremičnin in vidnosti naravnih dobrin;
- upravljanje s posameznimi vodnimi sistemi – načrtovanje ukrepov za izboljšanje stanja voda, kjer je trirazsežna upodobitev ključnega pomena za usklajevanje v procesih priprave dokumentov s področja gospodarjenja z vodami.

Razvoj informacijskih tehnologij je prinesel bistvene spremembe v vse veje znanosti, tudi v gospodarjenje z vodami. Začetne novosti so bile predvsem v povečani hitrosti izračunov simulacij obratovanja vodnih sistemov, kjer je potrebno v izračunih uporabljati itearacijske metode računanja ali pa izračun velikih matričnih shem, tj. numeričnih modelov. Kmalu pa se je z razvojem grafičnih zmogljivosti računalnikov pričelo grafično prikazovanje rezultatov izvedenih simulacij. Z metodami računalniške grafike so omogočeni tudi povsem novi prikazi na osnovi trirazsežnih prostorskih modelov, ki vključujejo tudi različne druge tematske sloje (Slika 1, vir: Eureka3D). Najpomembnejša prednost umeščanja vodnih sistemov v navidezna okolja, pred umeščanjem vodnih sistemov v obstoječe kartografske in geografske informacijske sisteme, ki so danes tudi lahko trirazsežna, je razumljivejša predstavitev zaradi prikaza tretje razsežnosti, tj. višin. Hkrati pa so v navideznem okolju omogočena simuliranja gibanja v realnem času, simulacije načrtovanih ureditev in vplivov na okolje v trirazsežnem

prostoru, ki je človeškemu zaznavanju mnogo bolj naraven kot dvorazsežna abstrakcija prostora, neposredno spremljanje dinamičnih pojavov in predvsem lažja priprava podatkov za matematične modele, ki uporabljajo 3R in tudi 2R prostor ipd. V navidezno okolje umeščene vodne sisteme lahko upravljamo že z namiznim računalnikom z ustrezno programsko opremo. Za potopitev¹ v navidezno okolje pa se uporabljajo tehnologije navidezne resničnosti z zmogljivejšimi računalniškimi sistemi in opremo za upodabljanje.



Slika 1: Trirazsežna upodobitev prostorskih podatkov.

Fig. 1: Three dimensional visualization of spatial data.

Vizualne trirazsežne informacije ljudje hitreje prevzemajo, saj jih človeški možgani bolje obdelujejo in učinkoviteje interpretirajo kot besedilne zapise, številčne vrednosti, diagrame in klasične karte. Razvoj vojaških simulacij in področje igralnih aplikacij sta prva uvidela možnost razvoja in uporabe trirazsežne grafike in uvajanja uporabe simulacij v navideznih okoljih. CAD programski paketi pa so začeli uvajati možnosti trirazsežnega modeliranja elementov realnega prostora in realistična upodabljanja trdih teles.

¹ Potopitev oz. vstop v navidezni oz. virtualni svet ti. imerzija.

Povpraševanje po prikazovanju vodnih sistemov v navideznem okolju narašča, tehnologija je dostopna, a vendarle so bili sedanji sistemi pretežno razviti le za komunikacijo z javnostmi, tj. za upodabljanje. Podrobnejše raziskovanje umeščanja vodnih sistemov v navidezna okolja je služilo predvsem za namene kartografije, kjer so elementi vodnih sistemov prikazani kot trirazsežni kartografski znaki saj je namen kartografije predvsem upodobitev in učinkovito posredovanje podatka uporabniku.

Za ustrezno umeščanje vodnih sistemov v navidezna okolja je potrebno vzpostaviti način in načela prikazovanja posameznih vodnih pojavov ter vodnih zgradb, naprav in ureditev v navideznih okoljih. Vprašanje, ki se poraja, je predvsem: Ali je potrebna generalizacija oziroma kolikšen nivo generalizacije trirazsežnega objekta v realnem svetu naj se uporabi, da bo v navideznem okolju vseboval ustrezno vizualno in semantično informacijo, ter bo hkrati ustrezno umeščen v prostoru.

Gospodarjenje z vodami je odgovoren in zapleten proces, v katerega vstopajo različni podatki, ki naj odgovorijo na pritiske, ki jih urbano okolje zahteva v urejanju voda. Primanjkljaj evidenc v obstoječih informacijskih sistemih so že prikazovali različni avtorji (Doyle et al, 1998; Gruber et al, 1997; Tempfli, 1998). Največ razprav pa je bilo o predstavljanju in analizi objektov v prostoru.

Na področju umeščanja vodnih sistemov v navidezna okolja je bilo v svetu opravljenih malo aktivnosti, saj je bilo dosedanje delo usmerjeno predvsem v upodabljanje umestitve posameznih objektov v navidezno okolje za potrebe komunikacije z javnostmi. Raziskovanja teoretičnih določitev načel in metodoloških rešitev s področja gospodarjenja z vodami pa v literaturi ni zaslediti.

Doktorska disertacija obstoječo prakso umeščanja vodnih sistemov v dvorazsežnem prostoru nadgrajuje z vsebinami, ki so značilne za trirazsežni prostor, tj. predvsem prikaz vodnih pojavov ter vodnih zgradb, naprav in ureditev na zemeljskem površju. Poudarek pa je dan na abstrakciji trirazsežne predstave (vizualni in vsebinski) posameznih elementov vodnih sistemov. Obstoječe prikaze elementov vodnih sistemov v dvorazsežnem prostoru razširjam z

novimi prostorskimi elementi, ki so značilni za trirazsežni prostor, tj. s ploskvijo in telesom. Hkrati pa je potrebno upoštevati tudi, da se točke, linije in poligoni v trirazsežnem prostoru obnašajo drugače kot v dvorazsežnem prostoru. Za izbrane elemente vodnih pojavov ter vodnih zgradb, naprav in ureditev prikazujem načela za umeščanje v navidezno okolje in podajam osnovne semantične opredelitve prostorskih teles.

Trenutno so v svetu uveljavljeni sistemi, ki obravnavajo prostorske informacije, pretežno 2R geografski informacijski sistemi (GIS), 3R sistemi za računalniško podprto načrtovanje (Computer added design – CAD) in 3R sistemi za izdelavo animacij. Izvorni namen CAD sistemov je ustvarjanje, urejanje in prikaz majhnih 3R grafičnih modelov, zato so slabosti vidne pri prikazovanju večjih modelov. Razvoj strojne opreme je odprl nove horizonte za 3R upodobitev, ki se pojmuje kot navidezna resničnost (*NR*). Nekatera oprema že omogoča popolno potopitev v trirazsežno okolje, simuliranje procesov in opazovanje odzivov podobnih, ki so v realnem svetu. Zato lahko trdimo, da teza Sutherland-a postaja realnost: "Gledali bomo v zaslon kot v okno virtualnega sveta. Izboljšave računalniške grafike bodo prikazovale sliko kot realno. Računalniki bodo ustvarjali model sveta v realnem času. Prikaz navideznih svetov bodo omogočali novi zasloni. Uporabnik bo lahko neposredno manipuliral s navideznimi objekti. Objekti se bodo gibali realistično. Navidezni svet bo zvenel in bo občuten realno." (Sutherland, 1970)

Nadalje je Brooks (1999) definirala navidezno resničnost kot vsako izkustvo, v katerem uporabnik učinkovito komunicira z odgovarjajočim navideznim svetom. Zaslone in naprave navidezne resničnosti omogočajo uporabniku vstop v interaktivni navidezni svet. Povezanost med strojno opremo navidezne resničnosti in navideznim svetom tvori navidezna okolja, navidezna resničnost pa je logično nadaljevanje interaktivne trirazsežne računalniške grafike.

Inženirske, arhitekturne in okoljske aplikacije navadno zahtevajo visok nivo realistične upodobitve navideznih objektov oz. variacije načrtovanih objektov. Nasprotno pa upodobitev znanstvenih podatkov ne zahteva realističnega prikaza, saj je upodobitev znanstvenih podatkov orientirana predvsem v prikazovanje abstraktnih količin (Bryson, 1994; Haase, 1994), ki pa so lahko prikazovane v navideznih okoljih, ki predstavljajo realna okolja.

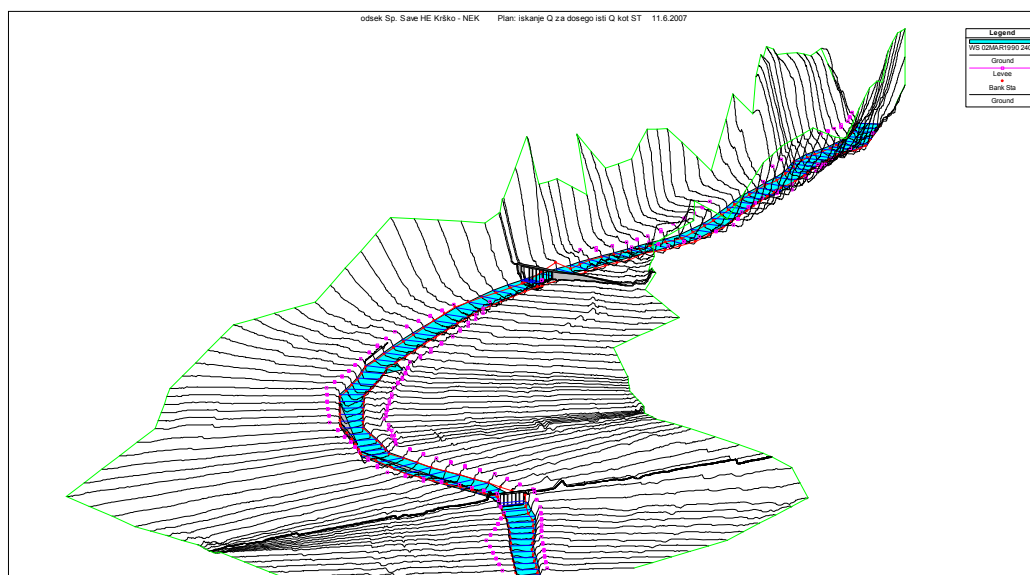
Elemente vodnih sistemov ne moremo prikazovati s prostorskimi podatki, ki predstavljajo konstantno geometrijo. Tak primer je jezero, ki je vodno telo s prosto gladino, na katerem potujejo valovi. Trirazsežna abstrakcija, skozi katero bi lahko pregledovali prostorske podatke o vodnih telesih, je sestavljena iz dinamičnih struktur s kompleksno geometrijo in topologijo. Ker orodja navidezne resničnosti omogočajo potovanje skozi kompleksne geometrijske strukture, mnogi raziskovalci verjamejo, da je navidezna resničnost ustrezno orodje za raziskovanje kompleksnih trirazsežnih elementov (van Dam et al., 2000), ki pa so gradniki ali pa neposredno predstavljajo vsebine različnih sistemov (topologija, stavba, prometnica, gladina vodotoka).

2 PREGLED LITERATURE

2.1 Predhodno delo in stanje tehnike

Raziskovanje na področju modeliranja v trirazsežnem prostoru je precej intenzivno, vendar še elementarno in razdrobljeno. Opravljajo ga različni strokovnjaki (GIS, računalniška grafika, CAD, računalniške igrice), s poudarki na konceptualnem ali izvedbenem (učinek) nivoju.

Posamezne aplikacije za izračun elementov vodnih sistemov, kot npr. hidravlični modeli, že omogočajo trirazsežni prikaz geometrijskih in vodnih podatkov (Slika 2), ali pa izvoz podatkov v druga grafična in geografska orodja (npr. CAD, GIS), kjer je mogoče ustvariti tudi drugačno pregledovanje. Vendar pa ta orodja ne omogočajo realističnega prikaza časovne dimenzije v enovitem grafičnem okolju in združevanje z drugimi vsebinami, ki so neposredno povezane (podatkovno in prostorsko) z vodnimi sistemi. Učinkovitost ukrepov (načrtovanih in izvedenih) na in v vodnih sistemih pa je odvisna tudi od drugih sistemov v prostoru, ki so neposredno ali posredno povezani z vodnim sistemom.



Slika 2: Prikaz 3R geometrije in gladine z zaporednimi prečnimi prerezi, uporabljen v hidravličnem modelu HEC-RAS, na primeru reke Save pri Krškem.

Fig. 2: Three dimensional presentation of cross section geometry and water surface, used in hydraulic model HEC-RAS at river Sava near Krško.

Dosedanje raziskave in izvedena navidezna okolja so potekala predvsem na področju raziskovanja uporabe in testiranja orodij navidezne resničnosti in kreiranju navideznih okolij, zato so bila v domeni informacijskih (računalniških) znanosti. Raziskave so bile predvsem spodbujane s strani splošno zanimivih ali pa kapitalsko močnejših področij (Brooks, 1999) npr.:

- avtomobilske simulacije – prve in tudi najboljše,
- sprostitev – navidezen sončni zahod, navidezno jezenje,
- načrtovanje avtomobilov – ergonomija, oblikovanje, inženiring,
- arhitekturno in krajinsko načrtovanje; naftne platforme,
- trening – NASA, piloti, navtika,
- medicina – psihiatrične terapije, učenje kirurških posegov,
- mikroskopsko sondiranje, idr.

Računalniška tehnologija je razvita do stopnje, da je zmožna prikazovati večje trirazsežne podatkovne nize. Prikazovanje večjih 3R modelov je že možno tudi na osebnih delovnih postajah. Nasa Word Wind in Google Earth (Slika 3, vir: Google Earth) uspešno demonstrirajo zmožnosti 3R upodabljanja uporabnikom medmrežja. Potreba po trirazsežnih prostorskih informacijah raste izrazito že od zgodnjih devetdesetih let prejšnjega stoletja. Preteklo raziskovanje na področju navidezne resničnosti lahko razdelimo predvsem na upodabljanje poselitvenih območij (Faust, 1995, Liggett in Jepson, 1995), prostorsko načrtovanje v trirazsežnem prostoru (Köninger in Bartel, 1998), 3R kataster (Billen in Zlatanova, 2003, Stoter 2002), spremljanje okolja (Bragdon, 1995). Večina raziskovanja je potekala v smeri prikazovanja kompleksnosti realnosti (Eichelberger, 1998, Lee, 1990) in analize specifičnih področij npr. transporta (Kwan, 2000), informacijskega sistema za obvladovanje nevarnosti (Kwan in Lee 2005), za prikaz zgradb (Batty in Howes, 1996) in monitoringa znotraj zgradb (Chung, 1999).

Za prikaz kompleksnih notranjih struktur zgradb (geometrijsko in vsebinsko) se v obstoječih zemljiških katastrih pojavljajo različne omejitve (Molen, 2003), pa čeprav lahko le-ti nudijo pomembne informacije o rabi zemljišč in zgradb, nevarnosti poplavljanja, katastrskih

dohodkih, ipd. Čeprav je prostorska informatika že dokazala uporabnost na mnogih področjih (npr. zemljiški kataster, promet, prostorsko načrtovanje, ipd.) z uporabo dvorazsežnih prostorskih podatkov (Raper, 2000), lahko 3R objekti, predstavljeni kot 2R projekcija, izgubijo nekatere lastnosti in prostorske relacije do drugih objektov (Billen in Zlatanova, 2003).

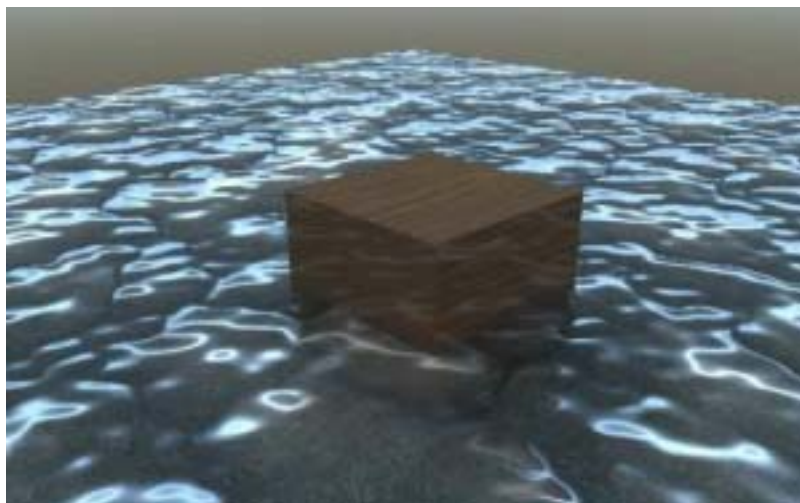


Slika 3: Prikaz Nebotičnika v Ljubljani.

Fig. 3: Nebotičnik in Ljubljana.

Simulacija, dandanes pretežno v digitalnem formatu, je pretežno bolj ali manj abstrakcija kompleksne stvarnosti. Mandelbrot (1999) je opisal osnovni problem digitalne predstavitve naravnih pojavov kot: "Oblaki niso krogle, planine niso stožci, obale niso krogi in drevesna skorja ni gladka, niti svetloba ne potuje v ravni črti." Podobno mnenje je izrazil Foley et al. (1990): "Osnovna težava doseganja popolne vizualne realnosti je v kompleksnosti realnega sveta. Opazujte obilje svojega okolja. Tu je mnogo površinskih tekstur (Slika 4, vir: 3Dstudio.com), nežnih prelivajočih se barv, senc, odbojev svetlobe, nepomembnih

nepravilnosti v okoliških objektih. Razmislite o vzorcih na gubah obleke, strukturo kože, razmršene lase, nedrseče podloge na tleh in drobce barve na stenah. Vse to sestavlja "realno" vizualno doživetje."



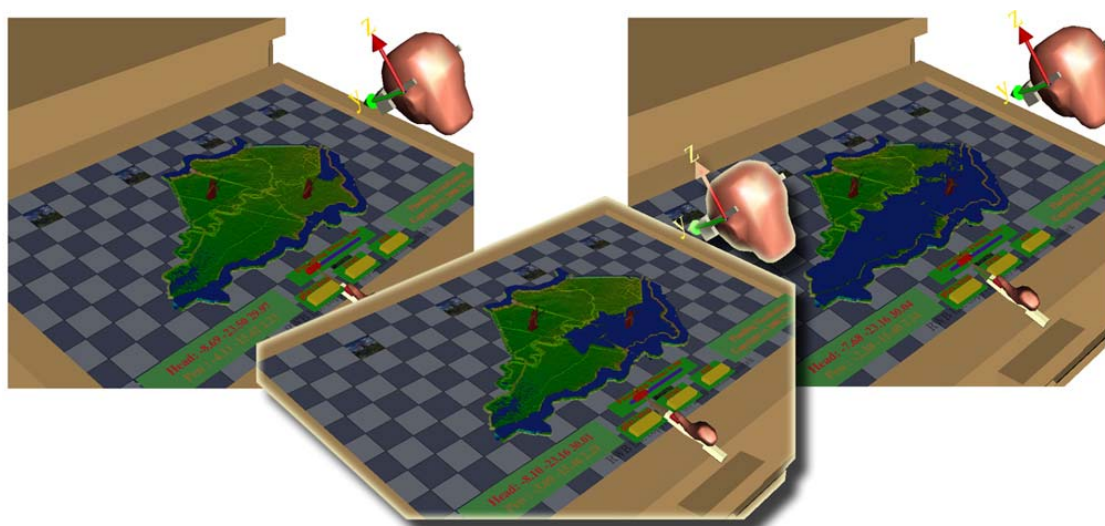
Slika 4: Realističen prikaz lesene kocke v vodi, položene na dno.

Fig. 4: Realistic presentation of wooden box in water, set on bottom.

Sicer pa lahko simulacije z manjšo stopnjo realističnega prikazovanja še vedno vsebujejo določenemu namenu potrebne informacije. Appleyard (1977) usmerja problem realističnega prikazovanja s tehničnega pogleda na vpliv različnih individualnih zaznavanj: "Ko nekdo govori o realističnih simulacijah, se pojavlja vprašanje: Katero realnost ali čigavo realnost želimo ponazoriti?" Predlagal je dve metodi za ugotovitev stopnje realizma prikaza (Appleyard, 1977): "Odločilen test stopnje realnosti je primerjava odzivov enake skupine na simulirano in na dejansko situacijo, in drugo, kot analiza slik, ki se lahko izvedejo z navideznim okoljem."

Celovito definicijo pojma "realistično" je podal Hall (1990): "Povzročiti doživljaj, ki je nerazločen od doživljanja realnega; povzročiti enake dražljaje kot v realnem svetu; proizvajati enake odzive kot v stvarni situaciji; ustvariti vtis stvarne situacije". Za zaznavanje stvarnosti ni potrebna natančna upodobitev detajlov geometrije, dokler je splošno obnašanje navideznega okolja primerno (Hall, 1990). Watzek in Ellsworth (1994) sta prikazala, da testne osebe niso zaznale do 15% spremembe geometrije .

Obstoječa navidezna okolja pretežno omogočajo sprehode med elementi navideznega okolja ter detekcijo prekrivanja elementov navideznega okolja in splošne prostorske reakcije med elementi navideznega okolja. Velik del raziskav se posveča tudi iskanju primerne tehnologije in orodij za delo z navideznimi okolji. To je bila predvsem domena informacijskih znanosti, saj je za izdelavo navideznega okolja bilo treba najprej ustvariti orodja, ki pa so vendar povezana z vsebinami področja uporabe. Tovrstnih orodij na področju modeliranja vodnih sistemov ni, oziroma so obstoječa orodja (Koutek, 2003, Gong et al., 2007) (Slika 5, Koutek, 2003) dokaj ozko vezana na testiranje tehnologij s specifičnimi modeli in zato sama po sebi omejena glede na omejitve modelov, za namen katerih so bila razvita.



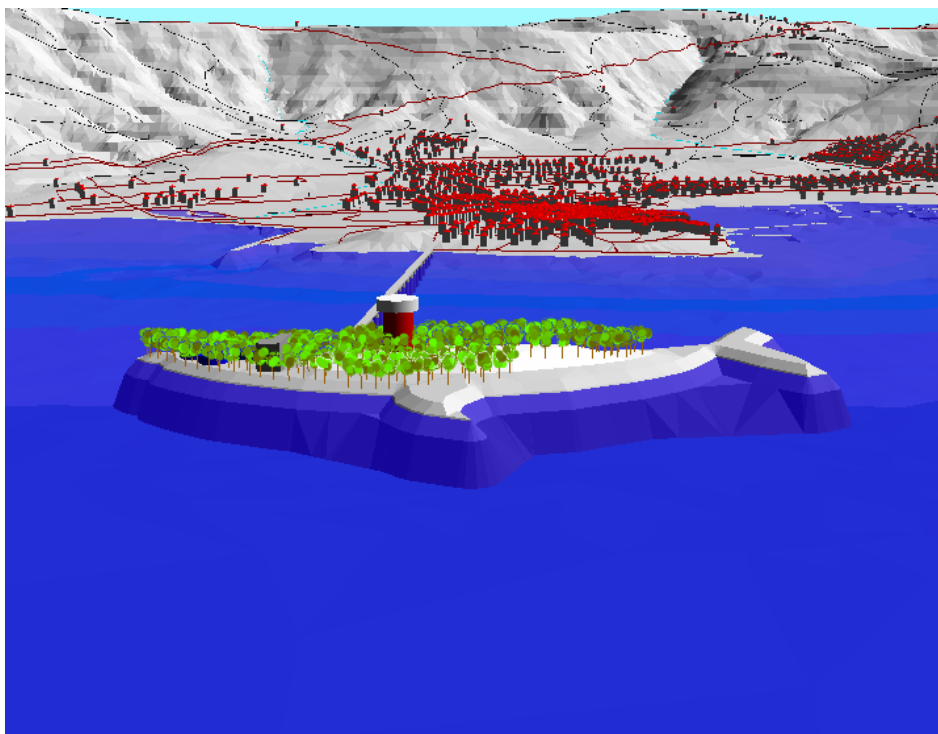
Slika 5: Interaktivna upodobitev poplavnih površin z orodjem navidezne resničnosti
Responsive Workbench.

Fig. 5: Interactive visualization of flooded areas with virtual reality tool
Responsive Workbench.

Vodilna ideja doktorske disertacije je, pripraviti umeščanje modelov vodnih sistemov v navidezna okolja kot podlago za širše raziskovanje interakcije vodnih sistemov v trirazsežnem prostoru, ki poleg upodabljanja ponuja tudi ustreznejšo semantično opredelitev posameznih entitet v prostoru.

2.2 Predhodno delo in stanje tehnike v Sloveniji

Delo na umeščanju vodnih sistemov v trirazsežna okolja je bilo v začetku devetdesetih let prejšnjega stoletja pogojeno z uporabo in razvojem CAD orodij. Že v začetku je bil vprašljiv zajem geometrijskih podatkov iz izdelanega modela terena, ki je vsebovalo tudi strugo vodotoka. Gosar (1996) je izdelal trirazsežni (žični) model odseka vodotoka v CAD sistemu CADdy in izvedel ekstrakcijo geometrijskih podatkov prečnih profilov za izračun gladin v numeričnem modelu. Rezultati, izračunane gladine, so bili nato prikazani v trirazsežnem modelu. Z uporabo GIS sistema ESRI ArcView in razširitve 3D Analyst so bili prikazani pravni režimi morja, obale in priobalnih zemljišč v navideznem okolju (Gosar, 2000). Model je zajemal celotno morje R Slovenije, širši priobalni pas, nekatere elemente slojev GKB25 (GURS) in celoten nabor zbranih pravnih režimov na morju in obali, ki so bili prikazani kot ploskovni elementi. V navideznem okolju obalnega območja je bila prikazana tudi simulacija razlitja nafte z različnimi koncentracijami v vodnem telesu morja. Ob izdelanem navideznem okolju obalnega območja je bila ponazorjena še ideja o umetnem otoku (Steinman in Gosar, 2002) (Slika 6, Steinman in Gosar, 2002).



Slika 6: V navidežno okolje umeščen umetni otok ob Izoli.

Fig. 6: Artificial island in front of Izola in virtual environment.

Petrovič (2001) je utemeljil načela oblikovanja izraznih sredstev v trirazsežnih kartografskih prikazih. S področja geografije je opisal vsebino 3R topografske karte in kartografsko opredelil pojem hidrografija kot skupen pojem za vode ter vodne zgradbe in pojave, ki vsebujejo vodo ali so neposredno vezani na vodo. Poudaril je pomembnost podrobnega prikaza, saj pojavnost vode vpliva na vse ostale geografske elemente (vegetacijo, poselitev, komunikacije). Izdelana načela pa se omejujejo na oblikovanje 3R kartografskih znakov (Slika 7, Petrovič, 2001). Šumrada (2005a in 2005b) dopolnjuje načela s prikazom postopkov za perspektivna prikazovanja prostorskih podatkov, vezano na obravnavo v sistemih GIS. Podrobno razčlenjuje faze izdelave prostorskih podatkovnih modelov GIS v trirazsežnem prostoru in tehnologije trirazsežne predstavitve prostorskih objektov.



Slika 7: Prikaz trirazsežnih kartografskih znakov vodnih objektov:
vodohran, kot grajeni objekt (levo) in izvir, kot vodni pojav (desno).

Fig. 7: Three dimensional cartographic presentation of water objects:
drinking water reservoir (left) and water spring (right).

Pri gradnji večjih infrastrukturnih objektov se pogosto uporablja tudi upodabljanje posegov v prostor, ki je pomembna oblika podajanja informacije za investitorja ter projektanta in dobra podlaga za sodelovanje z javnostmi. V Sloveniji je več podjetij, ki se ukvarjajo z zahtevnimi predstavitvami, pri delu pa uporabljajo najsodobnejše tehnologije zajema podatkov, upodabljanja in novejša grafična pogona, ki so pogosto tudi rezultat lastnega razvoja. Z uporabo naprednih računalniških tehnologij investitor dobi zelo dragocene povratne informacije, ki mu pomagajo pri pomembnih projektnih odločitvah, prav tako pa je vizualna simulacija tudi pomemben del tehnične dokumentacije projekta.

Na primer, za Holding slovenskih elektrarn je podjetje Logon d.o.o. izdelalo interaktivno predstavitev bodočih HE Blanca in HE Krško na spodnji Savi (Slika 8, vir: Logon d.o.o.).

Veriga HE predstavlja velik poseg v okolje, zato je natančna predstavitev bodočih hidroelektrarn strokovni in širši javnosti zelo pomembna. Predstavitev omogoča: preglede 3R animacij preletov nad elementi elektrarn, primerjave stanj pred in po izgradnji, preglede umestitve zgradb, naprav in ureditev v prostor. Uporabnik se lahko tudi interaktivno premika (leti, vozi, hodi) med objekti bodoče elektrarne s pomočjo interaktivne simulacije.

Tovrstne upodobitvene simulacije podajajo pomembne vizualne informacije o bodočih posegih v prostor, vendar so izdelane za potrebe predstavitve, zato ne vsebujejo semantičnih lastnosti o trirazsežnih elementih vodnih sistemov.



Slika 8: Vizualna simulacija bodoče hidroelektrarne HE Krško.

Fig. 8: Visualization of HPP Krško.

3 PREDSTAVITEV HIPOTEZE

Področje raziskovanja lahko razdelimo po obsegu in vsebini na dva večja sklopa:

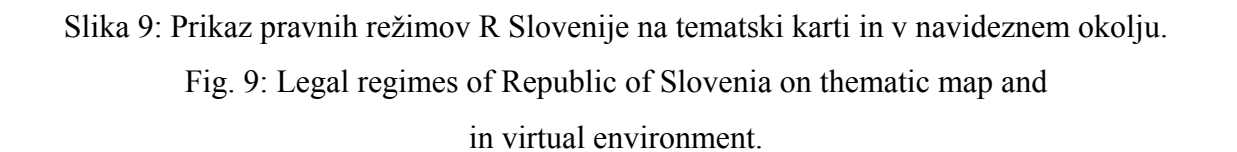
1. Izdelava teoretičnih izhodišč modelov vodnih sistemov v navideznem okolju.
2. Razvoj konceptualnega modela umeščanja elementov vodnih sistemov v navidežno okolje in testiranje modela.

3.1 Teoretična izhodišča modelov vodnih sistemov v navideznem okolju

Izhodišče za dokaz teze je opravljena analiza stanja in trendov pri uporabi upodabljanja podatkov o vodnih sistemih, ter analiza primerne metode iskanja interakcije med vodnimi sistemi v navideznih okoljih. Uporabljena so orodja, s katerimi je možno ustvarjati navidezna okolja (npr. ESRI ArcGIS 3D Analyst, Autodesk 3Ds/VIZ/Maya, idr.), in najprimernejša tehnologija za grafično upodabljanje v navideznem okolju (npr. DirectX, OpenGL, idr.).

Ključni prispevek znanosti je, vzpostavitev teoretične podlage za umestitev modelov vodnih sistemov v trirazsežni prostor (Slika 9², vir podatkov: Gosar, 2000), kar posledično zahteva tudi postavitev osnovnih relacij med elementi vodnih sistemov. Te teoretične podlage bodo nadalje omogočile razvoj in testiranje drugih orodij za umeščanje vodnih sistemov v navidežno okolje, npr. 3R GIS s področja voda. Raziskave na tem področju so v intenzivnem razvoju (Zlatanova, 2000, Zlatanova 2002b, Emgard in Zlatanova, 2008). Zato sem prikazal možnosti, prednosti in pomanjkljivosti prehoda iz obstoječih sistemov za upravljanje s podatki, ki slonijo predvsem na dvorazsežni interpretaciji in opisnih podatkih, na uporabo trirazsežnega dinamičnega navideznega okolja, v katerih so npr. geometrijski podatki opazovanega objekta že vključeni.

² Prikazani so pravni režimi morja R Slovenije na tematski karti (slika zgoraj) in umestitev pravnih režimov v navidežno okolje z uporabo programske opreme ESRI ArcView 3D Analyst (slika spodaj). Pravni režim zemljišč, naj bo to za vodno ali morsko zemljišče, predvsem prikazuje omejitve rabe morja ali vodnih zemljišč ter vpliv drugih (sosednjih) rab morja zaradi dinamičnih lastnosti morja, kot fluida. Pravni režimi morja so prikazani kot ploskve na zemeljskem površju ali gladini morja.



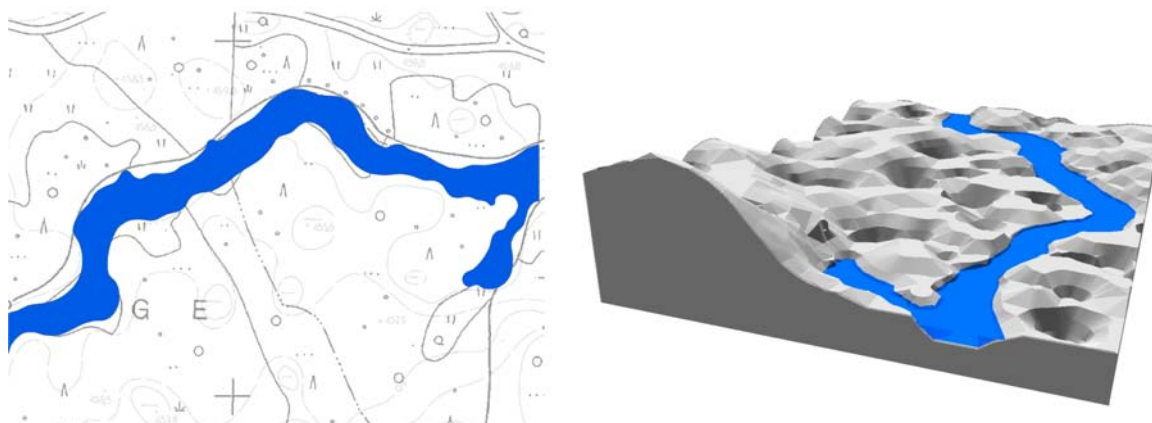
Razvoj elementov vodnih sistemov v navideznem okolju je pogojen z zmožnostjo človekovega zaznavanja pojavov, s stanjem razvoja informacijske tehnologije in s stopnjo zahtevane koncentracije podatkov, potrebne za odločanje.

Vsebinsko so opredeljene potrebne specifikacije osnovnih prostorskih in opisnih podatkov ter osnove podatkovnih struktur, ki omogočajo povezavo med opisnimi podatki in grafičnimi elementi navideznega okolja. S tem je podana podlaga za izvirno, v model vodnega okolja vključeno izdelavo vmesnikov med podatki o vodnem sistemu in orodji za prikaz navideznih okolij (npr. 3R GIS, navidezna resničnost ipd.). Ti vmesniki bodo v pretežni meri opredeljevali že izhodišča za potrebne prostorske standarde za vodne pojave in vodne objekte v navideznih okoljih.

Izdelane teoretične podlage in razvite specifičnosti modelov vodnih sistemov v navideznem okolju prinašajo novo metodologijo na področju voda, ki bo služila za izdelavo navideznega okolja, v katerega bodo umeščeni modeli vodnih sistemov. Tako razviti modeli vodnega sistema v navideznem okolju omogočajo tudi, da se vključujejo časovno odvisni podatki, ki imajo praviloma intenzivnejšo dinamiko, in da so opredeljene možne interakcije med vodnimi sistemi in drugimi dinamičnimi sistemi oziroma procesi.

Oblikovanje modelov vodnih sistemov v navideznih okoljih je v svetovnem merilu dokaj neraziskano področje, saj se je večina avtorjev, ki naslavljajo to področje, ukvarjala z njim kot dodatkom za boljšo predstavitev rezultatov matematičnih modelov, ne pa z raziskovalnimi vsebinami v teh orodjih, ki omogočajo njihovo uporabo za interaktivno modeliranje in gradnjo informacijskih sistemov.

Prehod umeščanja modelov vodnih sistemov iz dvorazsežnega okolja v trirazsežno dinamično okolje (Slika 10) lahko predstavlja podoben izziv kot izdelava prvih kart, v katero so bili umeščeni vodni sistemi. Da bi lahko opravili ta prehod, so obstoječe metode prostorskega umeščanja modelov vodnih sistemov v dvorazsežnih okoljih nadgrajene v navidezna okolja z uporabo sodobnih tehnik trirazsežnega modeliranja elementov. Pri tem so uporabljeni tudi podatki sodobne opreme daljinskega zaznavanja objektov in vodnih pojavov (npr. LIDAR), sodobnejša programska oprema za modeliranje in upodabljanje trirazsežnega okolja (npr. ESRI ArcGIS 3D Analyst, Autodesk VIZ in Maya) ter izdelava podatkovnih struktur (ESRI ArcGIS Spatial Database Engine na Microsoft SQL Server 2005 podatkovni bazi), npr. o akumulacijah v alpskem prostoru (Gosar et al., 2006b).



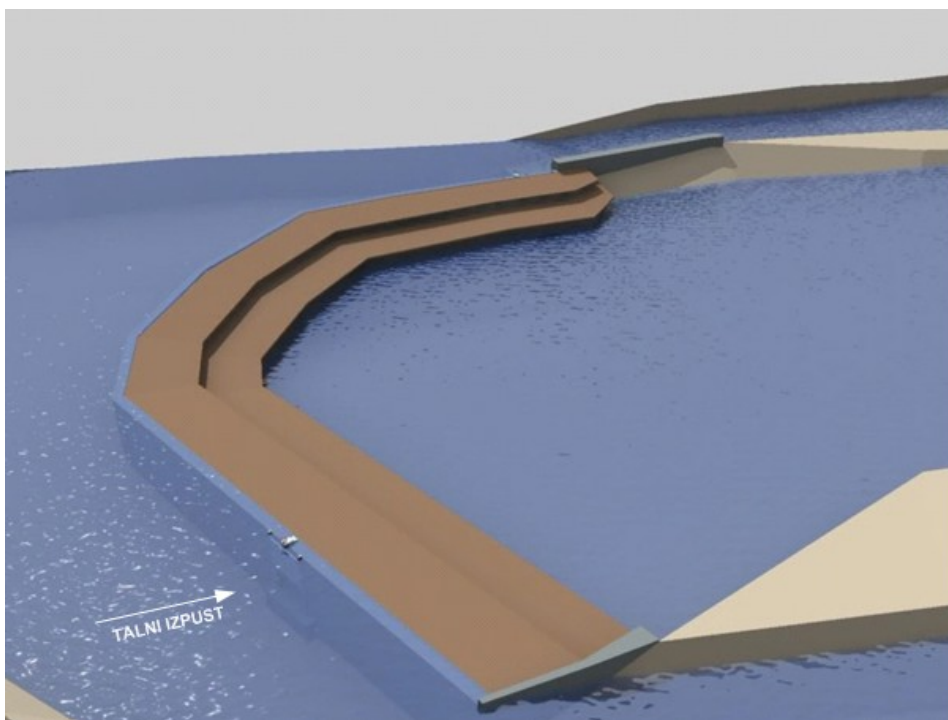
Slika 10: Prikaz odseka vodotoka v dvorazsežnem (levo) in trirazsežnem okolju (desno).

Fig. 10: Presentation of stream in 2D (left) and 3D environment (right).

3.3 Raziskovalni cilji obravnavane teze

Današnje modelne simulacije, sistemi daljinskega zaznavanja in načini terenskih ali laboratorijskih meritev proizvajajo velike količine podatkov. Za njihovo povezovanje, interpretacijo ter prikazovanje se je kot ustrezna pot, poleg statističnih analiz, pokazala uporaba upodabljanja podatkovnih baz. V preteklosti je upodabljanje podatkov potekalo v dveh oblikah, za namen raziskovanja in za predstavitve.

Cilj raziskovanja (rudarjenja) podatkov je, poiskati oblike zapisa ali vzorce obnašanja v podatkih, ki najbolj predstavljajo raziskovan (naravni) pojav (Haber & McNabb, 1990). Upodabljanje je pomembno v interpretiranju podatkov za mnoge znanstvene ali pa zgolj inženirske izzive današnjega časa, saj preoblikuje numerične podatke v vizualno predstavo, ki je človeku mnogo bolj prijazna (Slika 11, Gosar et al., 2008b). Druge metode, npr. statistične analize, lahko prikazujejo tako širši kot tudi lokalni pogled na del podatkov. Navidezna okolja pa lahko, kar je bilo v zadnjih letih že prikazano, ponudi zelo naravna okolja za upodobitev znanstvenih in inženirskih podatkov (npr. orodja navidezne resničnosti), ki so hkrati vključena v modele okolja, v katerem se nahajajo.

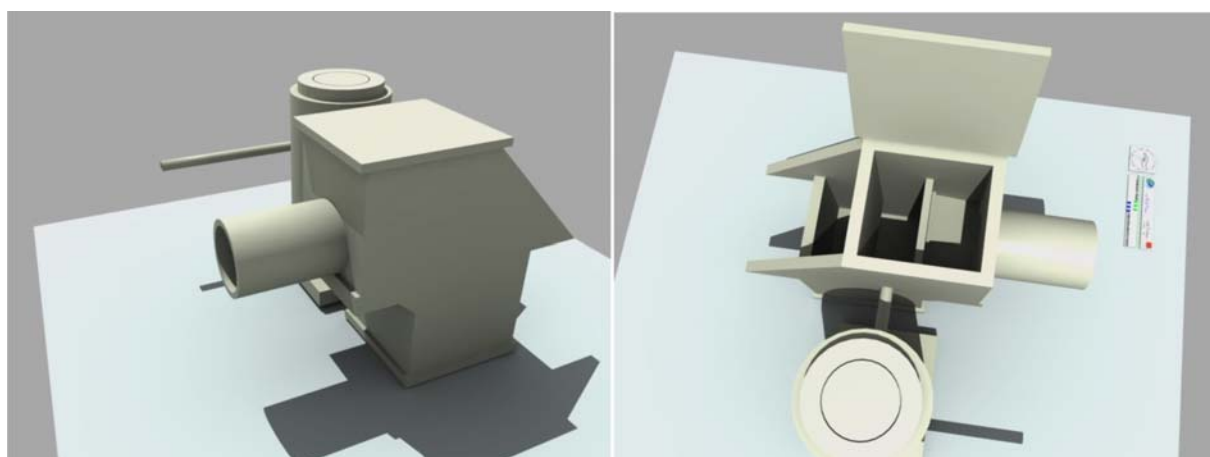


Slika 11: Model jezua na Dravinji pri Slapah (pod gladino vode je viden talni izpust).

Fig. 11: Barrage on Dravinja near Slape (under water surface is seen bottom outlet).

Vodni sistemi so, zaradi prepletanja procesov, ki se v njih dogajajo in interakcije z okoljem, ekstremno kompleksni pojavi, zato je za razumevanje le-teh potrebno uporabiti temu primerno napredna orodja. *Cilj disertacije je, podati nove načine za preučevanje interakcije med podatki (izmerjenimi ali modeliranimi) o vodnih sistemih z njihovo umestitvijo v navidezno okolje ter tako pridobivati nova znanja. Disertacija prikazuje, da je možen in potreben preskok iz obstoječih pristopov in sistemov za ravnanje s podatki o vodnih sistemih (atributni podatki, objekti), ki slonijo predvsem na dvorazsežnem prikazovanju, na dinamična trirazsežna navidezna okolja, ki omogočajo odkrivanje novih znanj zaradi večpredstavnosti informacij.* V množicah podatkov, ki nas obdajajo, je tako bil opravljen prehod na nove metode za koncentracije podatkov zaznavanja in analize, ki omogoča učinkovito podporo odločanju. Hkrati pa prehod iz dvorazsežnih okolij umeščanja v prostor na navidezna okolja predstavlja evolucijo dela z različnimi tipi prostorskih in opisnih podatkov s področja vodnega gospodarstva.

Moč navideznega okolja je največja zaradi antropogenosti njegove predstavnosti, saj s tem učinkoviteje združuje znanstveno skupnost, strokovno skupnost in zainteresirano javnost. Modeli vodnih sistemov so vedno obravnavani le parcialno, glede na področja, na katera so naslovljeni modeli, oziroma glede na območja reševanja problematike. Združevanje podatkov, ki ga danes opravljajo orodja geografskih informacijskih sistemov, delno omogočajo tudi integracijo časovne dimenzije ter interakcijo le-te z uporabnikom in ostalim delom (statičnega) okolja. Vključitev časovne dimenzije (npr. spreminjanje vodne gladine v času in prostoru, spremembe tlakov v vodooskrbnih sistemih, simulacije gibanja naprav ipd.) v statične ali dinamične elemente navideznega okolja omogoča tudi preglednejše zaznavanje obnašanja vodnega sistema in posameznih elementov (Slika 12, Gosar et al., 2008b) nasproti drugim sistemom ter prikazovanja dinamičnih stanj, s tem pa tudi boljše oz. dodatno zaznavanje problemov in njihovih vzrokov v vodnem sistemu.



Slika 12: Model tipskega jaška na AC Lenart - Cogetinci
(levo: celotna zgradba; desno: notranjost jaška ob odprtem pokrovu).

Fig. 12: Model of rain shaft on highway Lenart – Cogetinci.

Primarni izziv raziskovalnega dela je zagotoviti funkcionalnost modela vodnega sistema v navideznem okolju s stališča prostorskih informacijskih sistemov, vendar z novimi funkcionalnostmi, ki jih lahko omogočajo novejša tehnologije, npr. trirazsežno modeliranje in navidezna resničnost. S tem je tudi opravljen korak k približevanju hidravličnim fizičnim modelom, s katerimi lahko ugotavljamo tudi fenomene, ki jih ne poznamo, ki jih ne znamo v matematični obliki simulirati ali jih nismo pričakovali. Matematični modeli teh lastnosti

nimajo, saj podajo rešitev enačb zgolj za procese, ki smo jih matematično opisali. Optimizacija delovanja modelov vodnih sistemov v navideznem okolju pa presega meje raziskovalnega dela doktorske disertacije in razpoložljive tehnične opreme.

3.4 Organizacija raziskovanja

Raziskovanje se osredotoča na razvoj konceptualnega modela umeščanja elementov vodnih sistemov v navidezno okolje. Poudariti je treba nekaj ključnih izhodišč o področju raziskovanja:

- Integracija računalniške grafike in dosežkov prikaza prostorskih podatkov je še vedno pomanjkljiva, zato se raziskava usmerja na konceptualni in logični model kritičnih vsebinskih vidikov umeščanja vodnih sistemov v navidezna okolja.
- Znanje o geometriji in prostorskih relacijah v trirazsežnem prostoru je še vedno precej omejeno, raziskovanje pa je pretežno usmerjeno v področje geometrije. Semantični in časovno odvisni vidiki so v posameznih primerih prikazani le zaradi razlogov celovitosti.
- Trirazsežni prostor se pretežno opisuje z vektorji, kar je navadno uporabljeno tudi za prezentacijo zgradb in elementov narave v urbanih okoljih (Pilouk 1997, Tempfli 1998a), zato je zaradi prednosti takšnega načina prikaza podatkov (pravilne in nepravilne ploskve), shranjevanja podatkov (manjša količina podatkov), upodabljanje podatkov (uporaba standardnih grafičnih pogonov) ipd., raziskovanje usmerjeno (in včasih utesnjeno) v vektorski model.
- Topologija določa opis prostorskih relacij, ki so pomembne za funkcionalne lastnosti prostorskih podatkov (Kainz 1990), zato je treba razviti konceptualni model, ki opisuje trirazsežno topologijo elementov vodnih sistemov, v katerih se povezujejo naravne in grajene prvine okolja.
- Poleg geometrije in topologije je bistven prikaz semantičnih lastnosti elementov v prostoru saj te lastnosti niso vedno "vidne" v realnosti.
- Vprašanja, povezana z zbiranjem in pridobivanjem podatkov, niso neposredno predmet raziskovanj, razen v obsegu podatkov, ki so bili uporabljeni za testiranje modelov vodnih sistemov v navideznem okolju.

Poudarki so dani na analizi elementov vodnih sistemov in lastnosti, potrebnih za ponazoritev v navideznem okolju, ter interakcijo z modelom. Raziskovanje ne vključuje analize in razvoja tehnologij navideznega okolja, npr. 3R računalniške grafike, projekcijskih tehnologij, animacije, senčenja ipd., saj je to domena informacijskih in drugih znanosti. Zahtevnejša tehnologija navidezne resničnosti pri raziskovanju ni bila uporabljena, saj takšni pristopi zahtevajo precejšnja finančna vlaganja. Prav tako v disertaciji ni nameravano, da se vzpostavi popolnoma operativno in univerzalno navidezno okolje za umeščanje modelov vodnih sistemov v navidezno okolje, ker je za razvoj takšnih produktov potrebno timsko delo strokovnjakov različnih interdisciplinarnih znanj. Namen disertacije je torej, da razvije izdelan koncept vodnih sistemov v navideznem okolju in preveri koncept s testnimi modeli.

4 TEORETIČNA PODLAGA IN STRUKTURA RAZISKOVANJA

Poglavje prikazuje teoretična izhodišča in strukturo raziskovanja umeščanja modelov vodnih sistemov v navidežno okolje. Predhodno je potrebno definirati, kaj predstavljajo osnovni izrazi uporabljeni v doktorski disertaciji, npr. vodni sistem, navidežno okolje, čeprav ti izrazi niso novi, se pa ne pojavljajo pogosto v takšnem pomenskem sosledju, kot so v naslovu doktorske disertacije. Nadalje so opredeljene tehnologije prikazovanja, ki so le do takšne mere natančno prikazane kot je bilo treba, da so lahko v raziskovanju metod in tehnoloških rešitev navideznega okolja (in navidezne resničnosti) uporabljene. Pri uporabi novih metod in tehnoloških rešitev pa ne smemo prezreti niti uporabniških pričakovanj, saj gre za novejša tehnologije, ki pri uporabnikih še niso široko razširjene, a jih uporabniki z zanimanjem pričakujejo.

Vsebinsko se teoretično raziskovanje umeščanja vodnih sistemov v navidežno okolje naslanja na vodnogospodarske tematske karte, vendar ne v prikazovanju in topološki usmerjenosti, ampak v vsebinskem zajemu celotnega področja obravnave. V nalogi so bile izbrane, kot najpomembnejši vsebinski okvir teoretičnega raziskovanja, faze hidravličnega modeliranja, saj je uporaba modelov vodnih sistemov najpomembnejši člen v izdelavi hidravličnih modelov in pri modeliranju vodnih sistemov, ko je treba dokazati funkcioniranje vodnega sistema.

4.1 Model vodnega sistema in navidežno okolje

Za ustrezno obravnavo umeščanja vodnih sistemov v navidežno okolje je treba najprej definirati, kaj smatramo kot *model vodnega sistema*, ter kaj kot *navidežno okolje*.

4.1.1 Odnosi med modelom in originalom

Izraz "model" je ena najbolj pogosto uporabljenih besed na različnih področjih. Znanstveniki gradijo in dokazujejo hipoteze, izdelujejo napovedi, izmenjujejo ideje in pridobivajo znanja s

pomočjo modelov. Modeli se uporabljajo tudi za predstavljanje različnih pojavov na način, da so berljivi drugim. Iz pomena izraza, kot tudi iz podlage, na katerih so modeli grajeni, sledi, da morajo biti modeli razumljivi vsakomur. Vsakomur, ki je strokovno dovolj podkovan, da razume osnovne zakonitosti delovanja tovrstnih modelov.

Realen svet lahko opišemo samo v smislu abstraktnih modelov. Modeliranje imenujemo postopek snovanja, razvoja, izdelave in uporabe modelov. Model je opis ali ponazoritev nečesa stvarnega ali načrtovanega, oziroma še ne obstoječega, ki kot podrobna opredelitev predstavlja njegovo (poenostavljeno) nadomestilo. Model je vedno posplošen opis nečesa obstoječega ali zamišljenega. Prikaže bistvene sestavine in ignorira množico postranskih detajlov, povezav in lastnosti. Izbor vsebine modela je odvisen predvsem od njegove namembnosti in načrtovane uporabe. (Šumrada, 2005a).

Model odraža določene lastnosti originala. Odnos modela in originala je lahko homomorfen ali izomorfen. Homomorfni modeli predstavljajo poenostavljanje v odnosu do originala, saj model opisuje le bistvene lastnosti originala. To pomeni, da se tudi zaključki, ki jih opisuje takšen model, nanašajo le na bistvene lastnosti originala in so zaključki, ki jih dobimo na takšnem modelu, omejeni. Do poenostavitve ponavadi pridemo z združevanjem nepomembnih spremenljivk originala. Pri kompleksnih sistemih je normalno, da uporabljamo poenostavljene modele. Kljub temu je treba ugotoviti, da izomorfnost med modelom in originalom pomeni, da se model in original istovetno funkcionalno obnašata na relaciji vhod – izhod iz sistema, ne glede na njuno bistvo (Kljajić, 2002).

Po stopnjah podobnosti modela in originala ločimo:

- zunanjo podobnost,
- strukturno podobnost,
- funkcionalno podobnost.

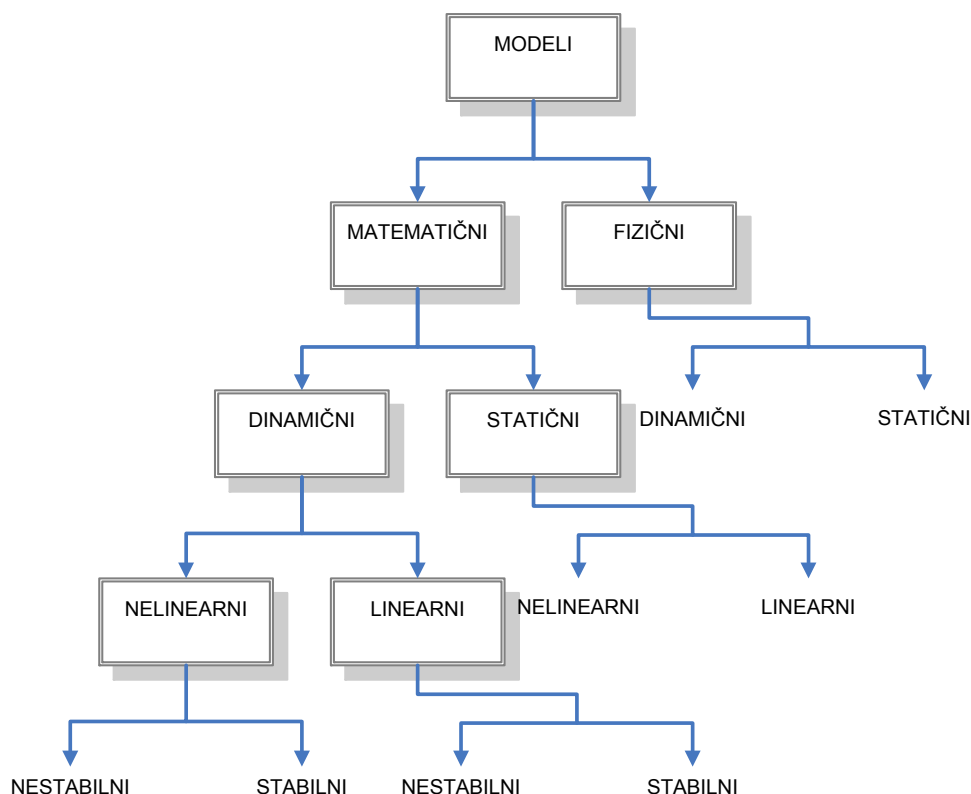
Po načinu modeliranja:

- metodo analogije,
- metodo črne škatle (black box),

- metodo sive škatle (gray box),
- metodo prozorne škatle (white box).

Tam, kjer uporabljamo metodo črne škatle, prevladujejo kvalitativno verbalne teorije in imamo opravka z družboslovjem, kjer pa so procesi, ki jih opisujemo na podlagi naravnih zakonov (white box), prevladujejo kvantitativno formalne teorije; to sta predvsem področji naravoslovja in tehnike.

V procesu modeliranja pogosto naletimo na različne ovire, kot je na primer nepoznavanje notranjosti procesa. Dostopno nam je le opazovanje njegovega obnašanja. To se lahko zgodi bodisi zato, ker nam sistem sam ne dovoli, da bi videli njegovo notranjost, ali pa zaradi ogromnega števila spremenljivk in njihove medsebojne prepletenosti nismo sposobni, da bi vse opisali (Kljajič, 2002). Modele lahko razvrščamo na več načinov (Slika 13, Forrester, 1961).



Slika 13: Klasifikacija modelov.

Fig. 13: Classification of models.

Izbira modela je odvisna od sistema, ki ga proučujemo. Slika 13 razčlenjuje fizične in abstraktne modele kot možen način proučevanja sistemov. Opozorimo naj še enkrat: slehernemu modelu predhodi teorija, ki je nujno kvalitativna. V odvisnosti od njene abstrakcije lahko govorimo o eksaktnih ali verbalnih teorijah, odvisno od pojava, ki ga želimo interpretirati. Fizični modeli so ponavadi poenostavljeni in zmanjšani realni sistemi, katerih lastnosti proučujemo. Fizični modeli nazorno predočajo obnašanja realnega sistema, predvsem njegovih pomembnejših lastnosti v določenem delovnem okolju in pri določenih pogojih (Kljajić, 2002). Statični fizični modeli so npr. prikaz urbanističnih in arhitektonskih rešitev v obliki maket, ki nam omogočajo vizualne predstave določene prostorske oblike. Dinamični fizikalni modeli so npr. aerodinamični tuneli za proučevanje lastnosti letal, hidrodinamični kanali za proučevanje hidrodinamičnih lastnosti ladij itn.

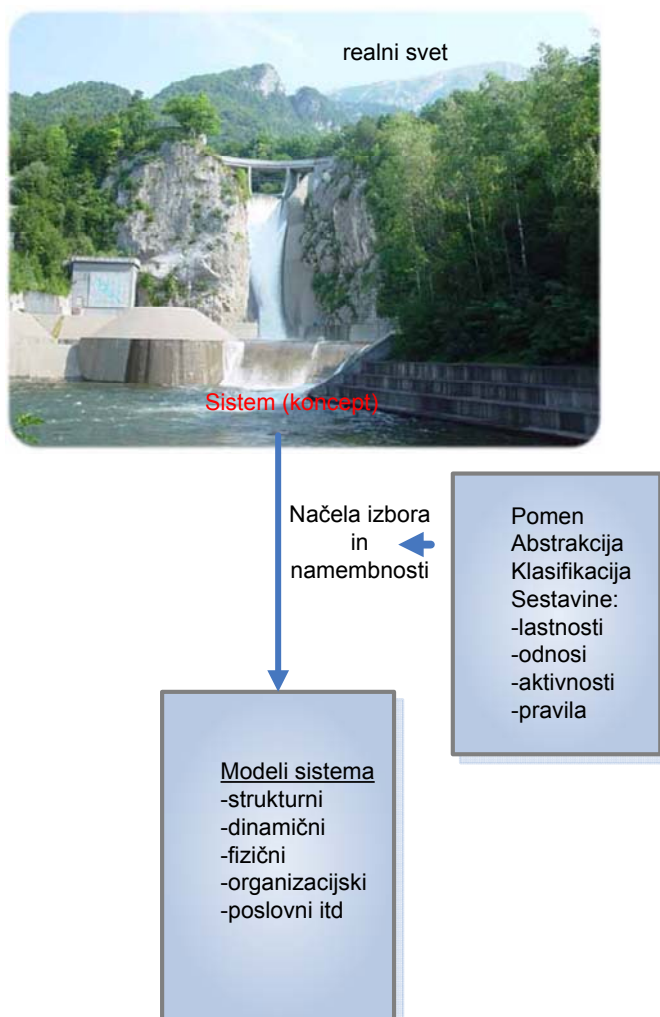
Kot dinamični fizični model bi lahko vzeli eksperimentalne oblike raziskav, kjer proučujemo vpliv ekoloških sprememb na različne vrste flore in favne in iščemo nove variacije z umetno mutacijo, da bi dobili vzorce, ki se najbolj prilagajajo novim pogojem, itn. Dobre lastnosti te vrste modelov so v tem, da so jasni in pregledni in v precejšni meri ustrezajo realnemu sistemu. Slaba stran je ta, da so veliki, nefleksibilni in pogosto ne pokažejo vzročno-posledične odvisnosti med posameznimi pojavi in spremenljivkami.

Obstaja veliko različnih modelov o številnih podobah sveta. Ena izmed razvrstitev modela se lahko opravi glede na način zaznavanja, t.i. resnični ali navidezni. V prvem primeru je potrebno izpostaviti nekatere lastnosti resničnega objekta (merjene, raziskane, opazovane) in jih uporabiti v gradnji modela. V drugem primeru mora uporabnik opisati lastnosti, karakteristike (načrtovane, izračunane, odločene) in jih sestaviti, da oblikuje model. Jasna meja med obema modeloma je včasih težko določljiva. Pomanjkanje merjenih podatkov je lahko tako veliko, da je za prikaz pojava potrebna (človekova) poenostavitev. V obeh primerih se proces izdelave modela imenuje modeliranje.

Druga razvrstitev modelov naslavlja njihovo obliko, digitalno ali ne-digitalno, tj. fizično (npr. papirnate karte, makete, fizične hidravlične modele, ipd.). Čeprav so včasih bolj razumljivi za ljudi, ne-digitalni modeli niso uporabljeni v računalniškem okolju. Prednost uporabe računalnikov za modeliranje dandanes ne potrebuje več utemeljevanja. Modeli, namenjeni za

prikazovanje sveta (okolja), ter na določen način tudi razumljivi računalniku, se imenujejo podatkovni modeli (Vossen, 1991). Na splošno so podatkovni modeli preprostejši od večine znanstvenih modelov.

Modeli so navadno podrobni opisi in prikazi, ki so prirejeni za določen namen in uporabo. Model lahko podaja opredelitev, kaj določen sistem tvori, kako se obnaša, lahko pa prav tako ponazori, kako takšen sistem deluje. Pomembno je najprej analitično dognati, kateri elementi sistem sestavljajo, šele nato lahko proučujemo ali načrtujemo, kako sistem dejansko deluje ali bo predvidoma deloval (Slika 14, po Šumrada, 2005a). Zelo je pomembno, da pri modeliranju sistema povezano obravnavamo njegovo sestavo in delovanje (Šumrada, 2005a).

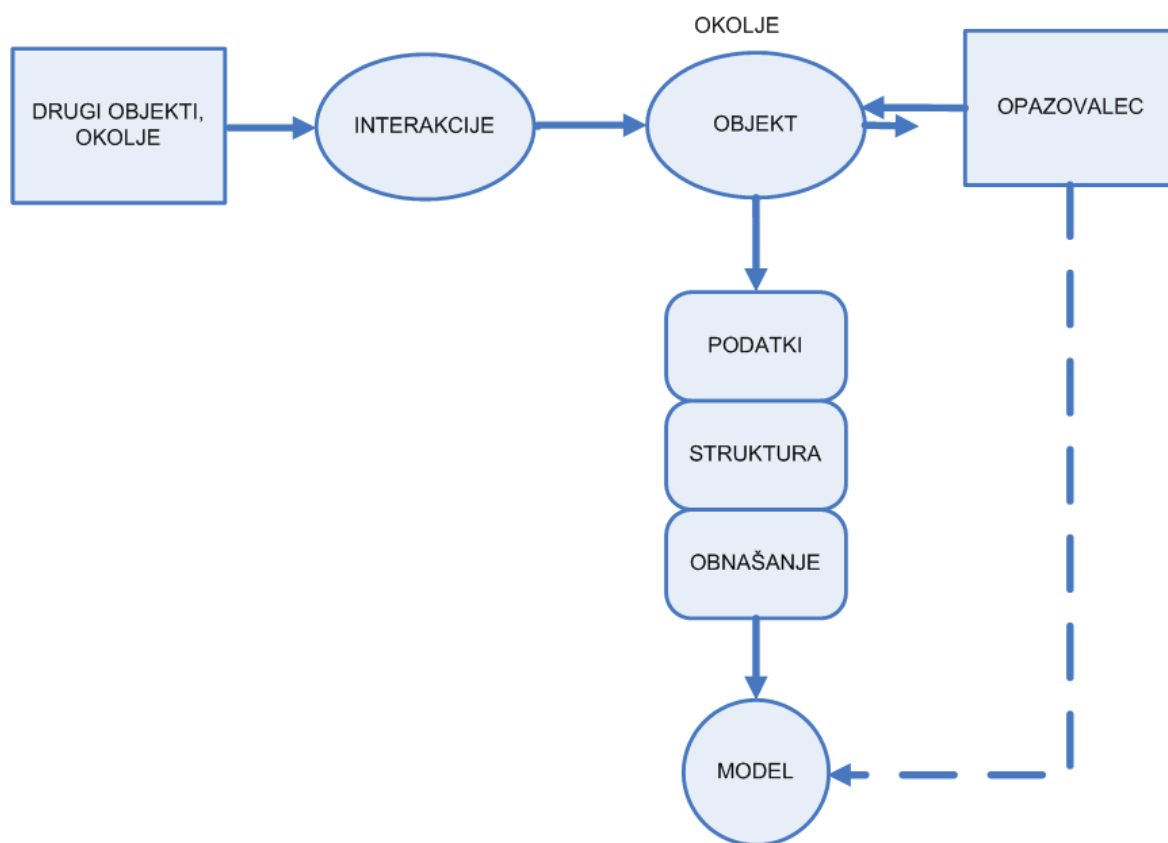


Slika 14: Modeliranje realnega in novega sistema.

Fig. 14: Modelling of real and new system.

4.1.2 Metodologija systemskega pristopa

Pojem systemskega pristopa je eden od načinov za iskanje najboljših, ali vsaj dovolj dobrih rešitev problemov, ob upoštevanju celovitosti in omejitev sistema (Slika 15, po Kljajić, 2002). Systemski pristop zahteva, da poznamo osnovne zakonitosti sistemov: obnašanje, lastnosti, gibanje, obstoj, razvoj, način izmenjave materije, energije in informacije z okoljem itn. Moramo spoznati metode njihovega proučevanja glede na določene lastnosti kot so: zapletenost, determiniranost, odprtost, evolutivnost, itn. Strogo vzeto, govorimo o usklajevanju pojavnih odvisnosti med elementi sistema (Kljajić, 2002).



Slika 15: Potek procesa modeliranja.

Fig. 15: Process of modelling.

Splošna teorija sistemov definira elemente in odnose v sistemu abstraktno, kajti preučuje njegove lastnosti, ki v konkretni analizi niso idealni. Imajo namreč specifične značilnosti, ki jih moramo upoštevati. V tem primeru je potrebna tipološka razmejitev sistemov, ki pomeni

razvrščanje sistemov v določene razrede glede na kriterij klasifikacije. Klasifikacija je pogojna in odvisna od tega, katero dominantno skupno lastnost sistemov želimo poudariti pri njihovem proučevanju. V literaturi obstajajo različni načini razvrščanja sistemov. V teoriji sistemov jih lahko razvrstimo po naslednjih značilnostih (Kljajič, 2002):

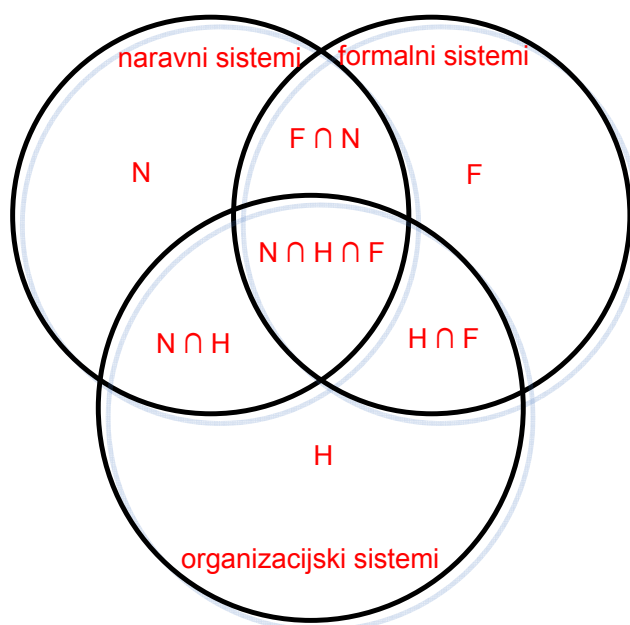
- način nastanka (naravni, umetni),
- stopnja abstrakcije (abstraktni, realni),
- vedenje v okolju (odprti, zaprti, delno odprti),
- časovna odvisnost (statični, dinamični),
- stopnja opredeljenosti (deterministični, stohastični, nedeterministični),
- tip funkcioniranja (linearni, nelinearni),
- stopnja sestavljenosti (enostavni, sestavljeni, kompleksni),
- stabilnost (stabilni, nestabilni, indiferentni)
- način razvoja (determinističen, organističen in sociološki).

Spoznavanje lastnosti sistema je temeljnega pomena za razumevanje njegovega delovanja ter za izbiro ustreznih metod za preučevanje njegovega obnašanja. Slika 16 in Slika 17 (Kljajič, 2002) ponazarjata možno kvalifikacijo sistemov po načinu nastanka in stopnji abstrakcije.

Prevladuje mnenje, da sisteme lahko razdelimo na formalne, naravne in organizacijske. Njihov medsebojni odnos lahko prikažemo z Vennovim diagramom na Slika 16 (Kljajič, 2002). Z medsebojnim odnosom posameznih skupin lahko prikažemo omejitve in veljavnost kvantitativnih metod za organizacijske sisteme.

Formalni in abstraktni sistemi so predvsem zanimivi s teoretskega vidika. Njihovi elementi so abstraktni pojmi, neke vrste platonski pojmi. V matematiki so to številke, simboli, črke, v geometriji točka, premica, ravnina, v lingvistiki črke, interpukcija itn. Odnos med takšnimi elementi določa sistem pravil, ki jim rečemo aksiomi. To so prvine, v katere resničnost ne dvomimo, bodisi da so očitne, ali da smo jih zbrali po definiciji. Edino pravilo, ki za aksiome velja, je da so neodvisni in da jih ni mogoče izpeljati iz drugih, ter da so konsistentni in logično neprotislovni. Takšnim sistemom pravimo apriorni in služijo kot pripomoček za preučevanje realnih, umetnih in naravnih sistemov. Teorija sistemov je abstrakten model realnih sistemov, in je vir metodologij za njihovo preučevanje. Z njihovo pomočjo lahko

formalno in precizno izrazimo ovire preučevanja problema in najdemo podobnosti med različnimi fenomeni. Na primer, s formalnim sistemom razumemo sistem simultanih matematičnih enačb in logičnih izrazov. Za vsako tako množico enačb lahko menimo, da tvori sistem. Vse njegove lastnosti so utelešene v teh izrazih, ki apriori omogočajo, da sistem spoznamo v celoti. Tako pri formalnih sistemih velja, da je vse apriorno znano, toda le v okviru prvin, ki smo jih vzeli za osnovne. Za te pa velja, da so logično dosledno izpeljane, neodvisne in neprotislovne. Toda če želimo v okviru izbranih aksiomov dokazati tudi sama pravila (torej najti sistem sistemov), naletimo na protislovja.



Slika 16: Vennov diagram klasifikacije sistema po bistvu.

Fig. 16: Venn's diagram of system classification by essence.

Naravni sistemi so podmnožica realnih sistemov, ki so nastali neodvisno od človekove volje in želje, in se obnašajo, razvijajo, rastejo in razpadajo po svojih naravnih zakonih. Sem sodijo, na primer astronomski, geofizični, meteorološki, ekološki, biološki itn. sistemi. Naravni sistemi predstavljajo naravno okolje, čeprav se naravni sistemi lahko pojavljajo kot deli (podsistemi ali elementi) umetnih sistemov. Človek, kot vrsta biološkega sistema, se na primer pojavlja kot osnovni element organizacijskih sistemov, kjer ga lahko proučujemo kot sociološko, ekonomsko, psihološko bitje itn. Ta primer kaže na kompleksnost vzajemnih povezav pojavov v naravi in težnje teorije sistemov, da določene aspekte izolira in klasificira

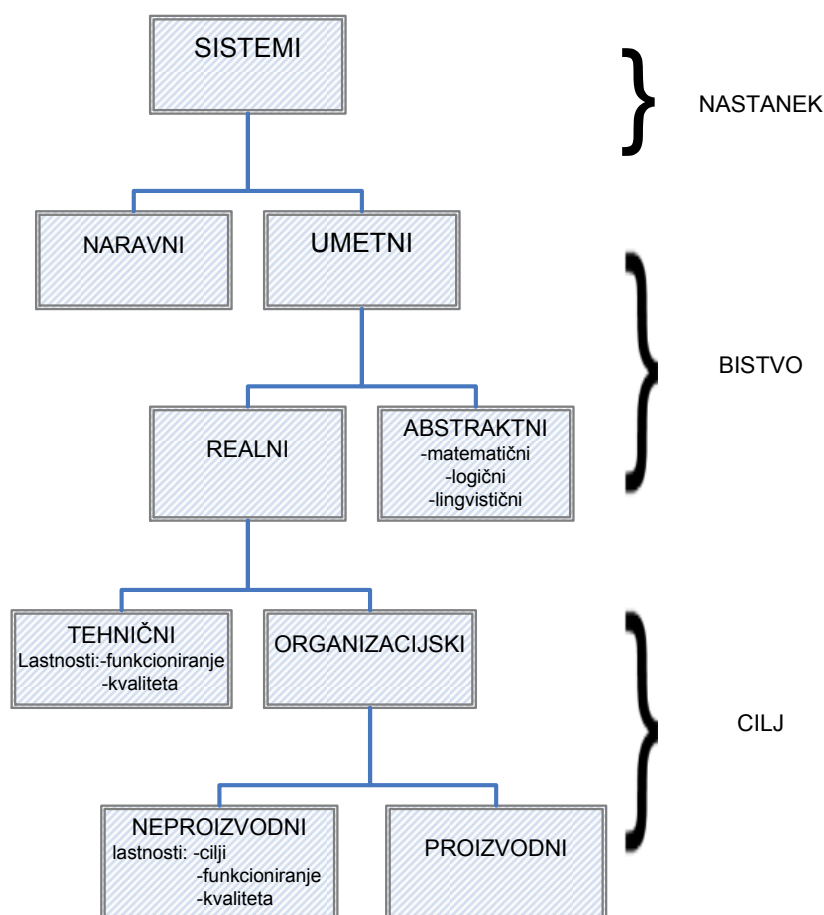
z namenom, da najde nekatere pomembne povezave v okviru celote. Med naravnimi in umetnimi sistemi ni popolnoma ostre in jasne meje. Gotovo so umetni sistemi sestavljeni iz naravnih in eksistirajo znotraj njih. To se pravi, da tudi eni na druge vzročno – posledično vplivajo, toda stopnjo povezanosti in procese interakcij šele spoznavamo. Z naravnim sistemom označujemo naraven fizikalen, biološki ali drugačen proces, katerega prvine in odnosi med njimi so posledica naravnih procesov. Poznavanje takšnega sistema lahko pridobimo le tako, da ga opazujemo in merimo, na podlagi česar potlej gradimo teorije in modele, ki jih je treba nato verificirati.

Družbene sisteme sestavljajo skupine ljudi, ki po nekem pravilu vzpostavljajo medsebojne odnose, da bi dosegli določene cilje. Znanje o teh sistemih je pretežno intuitivno. Odnose in lastnosti teh sistemov ne moremo v celoti razumeti, ne da bi bili vanje vključeni. Problem vrednostnih presoj raziskovalca je nujno del rezultatov raziskovanja. Posamezna apriorna znanja v okviru predpisov in regulative so znana, vendar to ni vse. Eksperimenti so lahko nevarni, hipoteze pa nepreverljive, kajti procesi so neponovljivi in nepovratni (Kljajić, 2002).

Tehnični sistemi so tisti, ki jih je naredil človek sam, z namenom, da bi si olajšal delo in življenje, v procesu uresničevanja svojih ciljev, preobrazbe svojega okolja in samega sebe. Tehnični sistemi so zgrajeni tako, da delujejo na podlagi naravnih zakonov. Njihova lastnost je funkcija in kvaliteta, ki jim jo določi tvorec. Sem spadajo: vse naprave, tehnična sredstva in agregati, kar jih je človek naredil. Na primer, hidroelektrarna, nuklearna elektrarna, televizor, računalnik itn.

Presečišče formalnih in družbenih sistemov so ponavadi skupine ljudi, ki so združeni v neki formalni strukturi iz določenih interesov zaradi doseganja skupnih ciljev, kot so na primer: države, športna društva, politične in verske organizacije, itd. Tej skupini organizacijskih sistemov pravimo, z ozirom na cilje, ki jih zasleduje, moralni sistemi. S formalnim zapisom strukture sistema razumemo na primer urejanje pravnih odnosov med subjekti in družbo. Pomembno je, da je sistem predpisov neprotisloven in enostaven (nekompliciran), da omogoči svobodo in razvoj posameznika in družbe ter hkrati tudi prepreči anarhijo. Seveda ta pravila niso zgolj formalna. S formo želimo le, da logično neoporečno zajamemo dosežke

civilizacije tega časa. Presek naravnih in družbenih sistemov pa so ekološki sistemi (Kljajić, 2002).



Slika 17: Klasifikacija sistemov po nastanku, bistvu in ciljih.

Fig. 17: System classification by rise, essence and goals.

Glede na to, da so omenjeni trije razredi (naravni, družbeni in tehnični) vsebinsko različni, ne moremo pri preučevanju družbenih pojavov nekritično uporabljati metod, ki so bile uspešne pri naravnih ali naravno formalnih sistemih. Sisteme, pri katerih je človeški element v večji meri prisoten, težko celovito preučujemo s tako imenovanimi kvantitativnimi metodami. Lahko jih uporabljamo, ko obravnavamo nekatere njihove podsisteme ali vidike oziroma izbranega družbenega dejavnika v sistemu. To je sicer jasno, toda situacija ni dosti boljša tudi pri formalnih in naravnih sistemih. Tudi tam naletimo na omejitve metod, vendar so te metode principiелno drugačne. Za upravljanje so zelo pomembni umetni sistemi, torej tisti, ki jih je

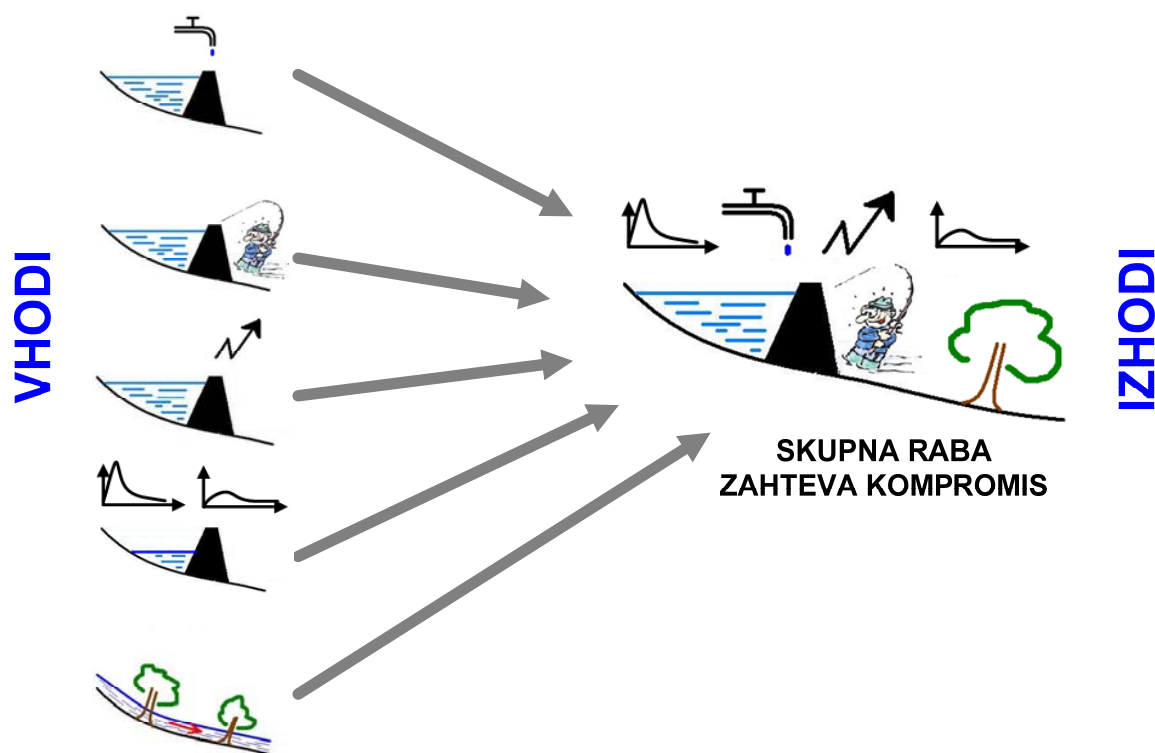
zgradil človek na podlagi naravnih zakonov in družbenih norm in jim opredelil cilj, kvaliteto in funkcioniranje (Kljajić, 2002).

4.1.3 Vodni sistem

Sistem je integrirana skupina interaktivnih elementov, ki skupaj izvajajo neko funkcijo.

Teorija sistemov se je razvila kot znanstvena disciplina, ki proučuje sisteme z generalizacijo podobnosti sistemov različnih naravnih dogodkov in mora biti abstraktna, da bi se pojmi in rezultati lahko uporabljali v zvezi konkretnih tehničnih, poslovnih, ekonomskih, bioloških in drugih sistemov. Sistemi so navadno pod vplivom in spremembami, ki se dogajajo izven sistema, v tako imenovani okolici sistema. Okolico opazovanega sistema sestavljajo tudi drugi sistemi, ki so z njim v interakciji. Interakcija je dvosmerna, saj prihajajo informacije (vhodi v sistem) v opazovani sistem iz drugih sistemov, opazovani sistem pa pošilja informacije (izhodi sistema) drugim sistemom. To pomeni, da okolico opazovanega sistema sestavljajo izvori vhodov in prejemnikov izhodov (Opricović, 1992). Na primeru vodnega rezervoarja (Slika 18, Opricović, 1992) lahko ponazorimo različne vrste rab v enakem sistemu. Rezervoar (kot objekt) lahko uporabljamo npr. kot rezervoar pitne vode, za športni ribolov, za proizvodnjo električne energije, za varstvo pred škodljivim delovanjem voda, kot grajen objekt pa je povzročil tudi veliko spremembo v naravnem okolju, ipd. Le optimizacija sistema lahko vodi h kompromisom rabe vode za vse načrtovane namene.

Margeta (1992) je vodni sistem definiral z vidika gospodarjenja z vodami oz. natančneje, sistema gospodarjenja z vodami (Slika 19, Margeta, 1992). Sistem gospodarjenja z vodami je konfiguracija objektov in različnih upravnih ukrepov, ki imajo vzpostavljene relacije z vodnimi viri, vodnimi storitvami in proizvodi, kot tudi z inštitucijami, skozi katere se transformacija odvija. Vodni pojavi predstavljajo vhod v sistem, izhod pa storitve in proizvodi povezani z vodo.



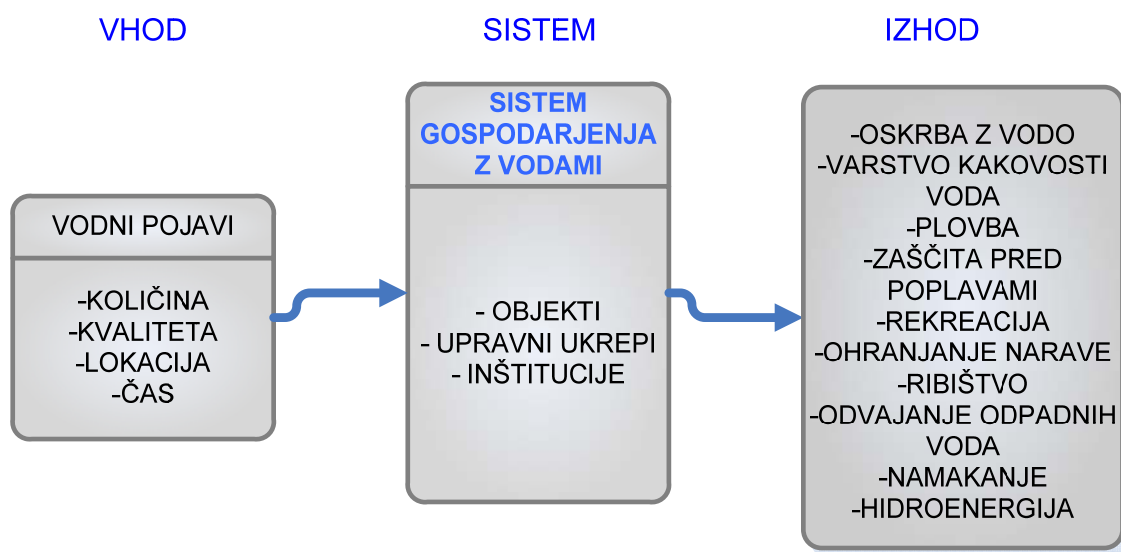
Slika 18: Mnogo funkcijski sistemski pristop rabe vodnega rezervoarja.

Fig. 18: Multifunctional systemic approach using of reservoir.

Vodni sistem je definiran kot skupina elementov, ki so medsebojno odvisni in delujejo v urejenem in odvisnem delovanju. Vodni sistemi imajo naslednje lastnosti (Margeta, 1992):

- Znana je meja sistema, ki ima funkcijo določevanja ali je nek element sestavni del sistema ali njegove okolice.
- Znano je stanje vhodov in izhodov ter njihova interakcija glede na okolico sistema.
- Definirano je stanje odnosov med elementi sistema, vhodov in izhodov ter zunanjih odnosov med vhodi in izhodi (povratno delovanje).

Relacije med elementi so lahko naravne (npr. hidrologija), energetske (npr. upravljanje in nadzor) in nematerialne (npr. administrativne), kot so kapital, predpisi, pravila stroke, ipd. V vodnem sistemu se vse lastnosti spreminjajo glede na velikost in kompleksnost sistema, kot tudi glede na nivo obdelave (analize) sistema.



Slika 19: Sistem gospodarjenja z vodo.

Fig. 19: Water management system.

Sisteme delimo na podsisteme zaradi lažjega razumevanja in obvladovanja kompleksnih sistemov (Margeta, 1992). Podsistemi imajo nekatere skupne značilnosti, kar jih razlikuje od drugih. Ena pomembnih lastnosti vodnih sistemov je, da se ne morejo v naprej predvideti vsi odnosi med podsistemi niti podsistemi in njihove okolice. Zaradi tovrstnih lastnosti vodnih sistemov moramo uporabljati hierarhični pristop reševanja problemov, ki se začne s širšim pogledom na sistem in manjšo natančnostjo analiz in opisa elementov sistema. Z rešitvami (rezultati problemov) se pogled na sistem oži, natančnost pa povečuje.

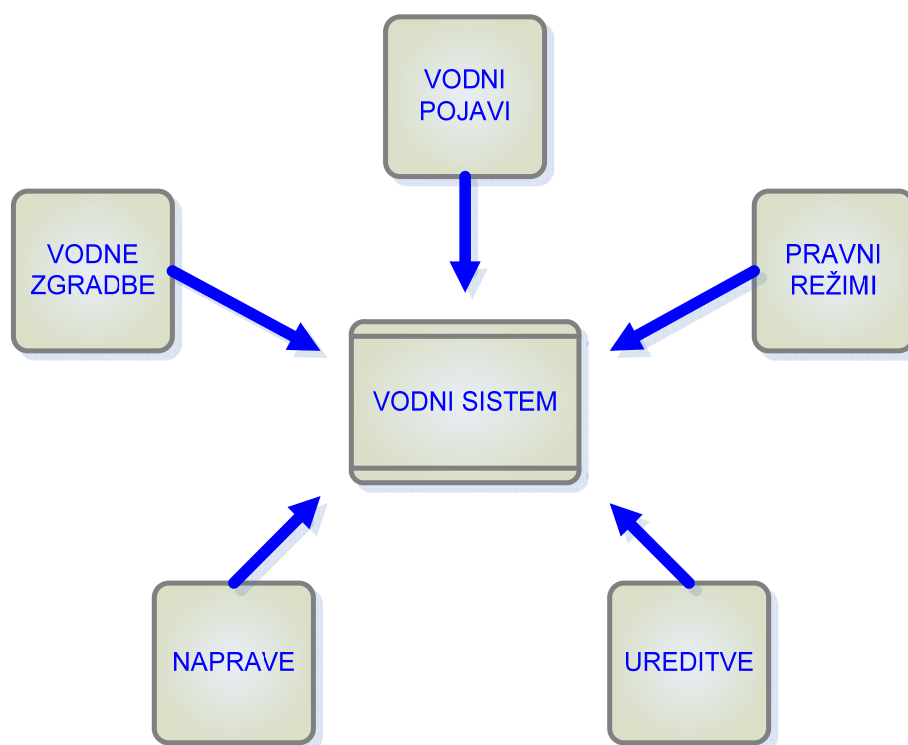
Banovec (2001) je določil analitski prostor za obravnavanje vodnogospodarskih sistemov s sistemom podatkov, ki so opredeljeni s tehničnimi, ekonomskimi in pravnimi vsebinami.

V doktorski disertaciji definiram vodni sistem kot strukturiran nabor vodnih pojavov, vodnih zgradb, naprav, ureditev in pravnih režimov, ki so med seboj soodvisni, tako da lahko učinkovito delujejo (enačba 1, Slika 20).

vodni sistem = vodni pojavi + zgradbe + naprave + ureditve + pravni režimi

$$VS = VP + Z + N + U + PR \quad (1)$$

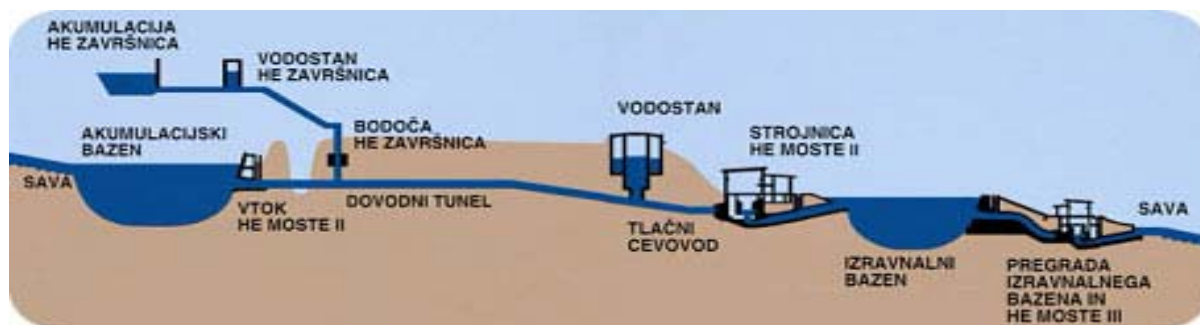
Vodni pojavi (VP) so naravni ali po človeku povzročeni elementi v prostoru in času, kjer se voda nahaja v tekočem ali trdnem stanju (Horvat et al., 2001). Vodne zgradbe (Z) so gradbeni objekti s katerimi se zagotavlja načrtovana raven urejenosti vodnih zemljišč, zagotavlja varstvo pred škodljivim delovanjem voda in vpliva na dinamiko vodnih količin v času in prostoru (Horvat et al., 2001). Vodne naprave (N) so naprave, s katerimi se zagotavlja načrtovana raba vode, zagotavlja varstvo pred škodljivim delovanjem voda in vpliva na dinamiko vodnih količin v času in prostoru ter omogoča nekatere rabe vode (Horvat et al., 2001). Vodne ureditve (U) so ureditve, s katerimi se zagotavlja načrtovana raven urejenosti vodnih zemljišč in rabe voda, zagotavlja varstvo pred škodljivim delovanjem voda in vpliva na dinamiko vodnih količin v času in prostoru (Horvat et al., 2001). Pravni režimi so pravna pravila, s katerimi predpis s področja upravnega prava določa način uživanja dodeljene posebne pravice in obveznosti na določenem območju, kadar za to obstaja podlaga v zakonu in podani kriteriji, pod katerimi se pravni režim nedvoumno lahko določi (Gosar, 2000). Vodne zgradbe in vodne naprave sestavljajo elementi po standardih. Ureditve sestavljajo elementi po standardih in biotehnični elementi (Steinman in Gosar, 2008).



Slika 20: Sestavine vodnega sistema.

Fig. 20: Water system components.

Model vodnega sistema je sistematično izbrana in opredeljena abstrakcija³ povezanih vodnih pojavov ter zgradb, naprav in ureditev, ki skupaj tvorijo sistem gospodarjenja z vodami za doseganje določenega cilja ali namena (Slika 21, Steinman in Gosar, 2008). Modeli vodnih sistemov se lahko med seboj združujejo ali pa vsebujejo podsisteme, ki se lahko obravnavajo samostojno.



Slika 21: HE Moste – prikaz pomembnejših elementov grajenega vodnega sistema.

Fig. 21: Hydroelectric power station Moste – important elements of built water system.

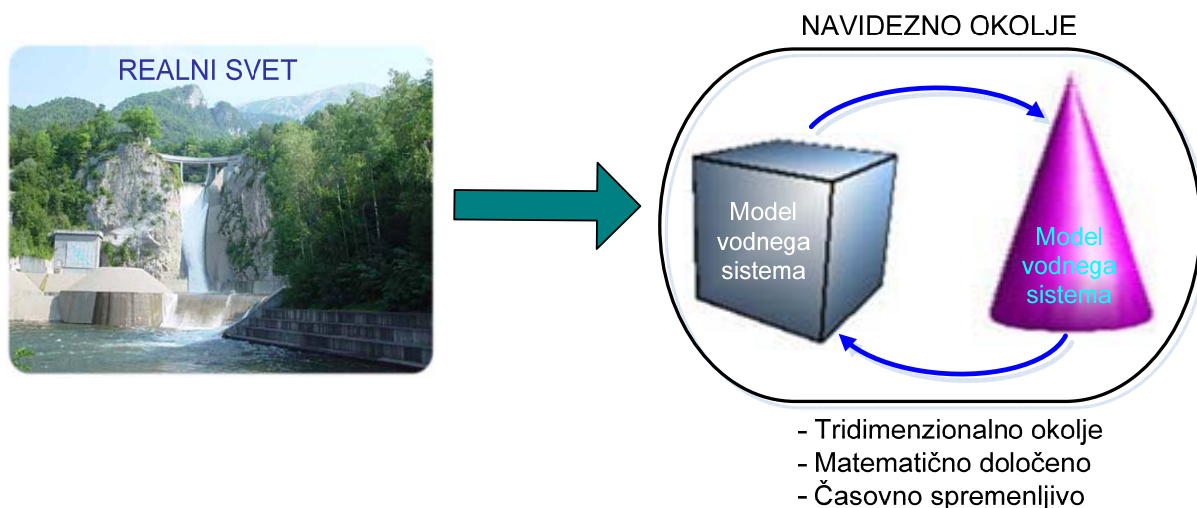
4.1.4 Navidezno okolje

Prostorska slika je definirana kot navidezni pojav, ki ga opazujemo s sistemom vidne zaznave (očesni vid), ne da bi imeli realni pogled na model ali prostor. Pomembni lastnosti prostorske slike, ki vplivata na njeno uporabnost, sta možnost spreminjanja grafičnih spremenljivk in stopnja globine slike, kamor prištevamo ločljivost in barvno globino. Stopnja zaznavanja pa je sinteza vseh dejavnikov, ki opisno določa nivo uporabnosti in učinkovitosti 3R predstave pri posamezni tehniki (Petrovič, 2001).

Navidezno okolje smatramo kot univerzalno trirazsežno grafično okolje, matematično opisno določeno, ki lahko vsebuje tudi časovno komponento (t.i. četrto razsežnost), izdelano z orodji informacijske tehnologije, ki prikazuje trirazsežen, visoko realističen prikaz zemeljskega površja z naravnimi pojavi in grajenimi objekti (Slika 22). Lahko izhaja iz realnega ali

³ Abstrakcija je miselni proces, pri katerem pride do razločevanja med idejami in objekti. Abstrakcija uporablja strategijo poenostavitve podrobnosti, pri čemer prej stvarne podrobnosti postanejo dvoumne, nedoločene ali neopredeljene. (Vir: Wikipedija)

namišljenega prostora, v katerega so umeščeni vodni sistemi. Navidežno okolje je v doktorski disertaciji uporabljeno kot grafično okolje neodvisno od tehnološke rešitve, npr. programske opreme za uporabljanje (3R CAD, 3R GIS), grafičnega pogona, ipd.



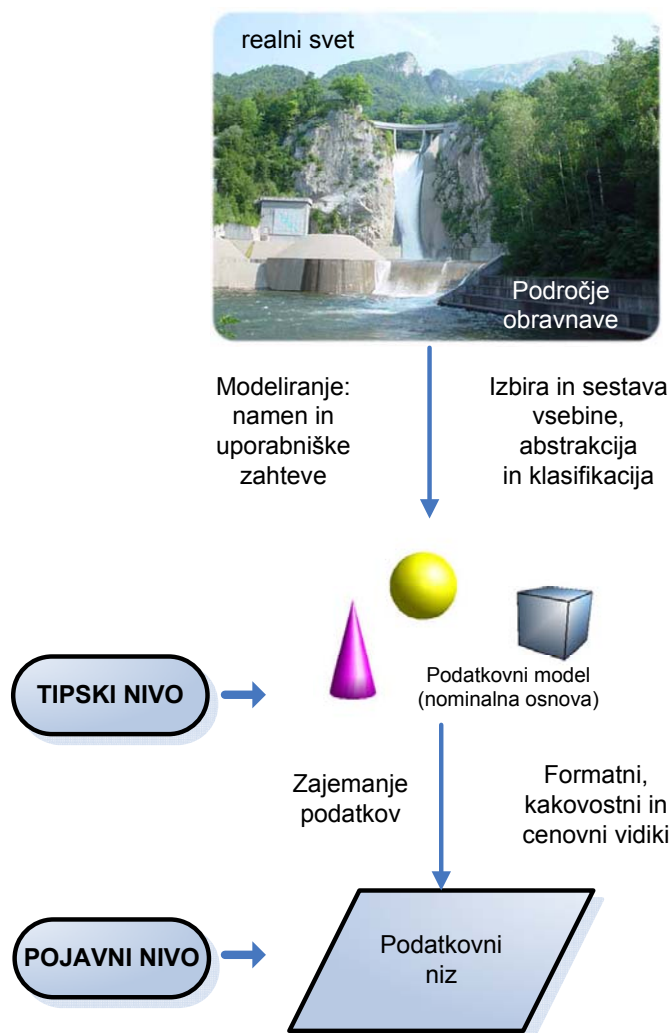
Slika 22: Opredelitev navideznega okolja.

Fig. 22: Virtual environment determination.

Navidežno okolje je tako navidezna predstavitev sveta, ki uporabniku omogoča raziskovanje in interakcijo z veliko količino naravnih in antropogenih informacij o naravnem in grajenem okolju. V primerjavi z geografskim informacijskim sistemom, ki je osredotočen na same podatke, naj bi bilo navidežno okolje osredotočeno na uporabnika. Navidežno okolje z umeščenimi vodnimi sistemi naj bi se tudi razlikovalo od standardnih okolij navidezne resničnosti, kjer se mnogokrat pojavlja nerealistični občutek oz. zaznava.

V doktorski disertaciji je dan poudarek predvsem na trirazsežnem prostoru, čeprav tudi dvorazsežni modeli lahko predstavljajo navidežno okolje. Obravnavana bo torej abstrakcija realnega sveta, v katerem shematsko opisujemo ali ponazarjamo elemente vodnih sistemov, tj. vodne pojave, vodne zgradbe, naprave, ureditve in pravne režime. Zaradi shematskega prikaza vodnega sistema v navideznem okolju uporabniku modela usmerjamo pozornost na tiste elemente vodnih sistemov, ki zagotavljajo obratovanje, hkrati pa je omogočeno združevanje in povezovanje modelov vodnih sistemov v enotnem navideznem okolju za celovito

gospodarjenje z vodami (Slika 23, Šumrada, 2005a), kot je tudi shematsko prikazano z najpomembnejšimi elementi grajenega vodnega sistema HE Moste (Slika 21).



Slika 23: Osnovna načela in potek procesa modeliranja na tipskem in pojavnem nivoju.

Fig. 23: Main principles and modelling process.

Prostorske informacije se, zaradi edinstvenih lastnosti položaja v prostoru in večrazsežne strukture dinamičnega spreminjanja, rahlo razlikujejo od ostalih informacij. Iz tega vzroka, so večrazsežne in dinamične analize postale osnoven pristop za raziskovanje prostorskih problemov vseh razsežnosti. Če obvladujemo celoten večrazsežen prostor, lahko vse vrste informacij neovirano in brez izločanja uporabljamo. Razsežnosti povezane z navideznim okoljem, ne predstavljajo le običajnih ortogonalnih prostorskih razsežnosti (X,Y,Z), temveč tudi ne-prostorske razsežnosti kot npr. tematske in časovne: sence, barve, opis materiala, sile

in zvoka. Karkoli že obravnavamo: 1R govor ali tekst, 2R karto, 2.5R DTM (digitalni model terena), 3R GIS, 4R animacije ali xR tematske attribute, vsak ima svoje relativne prednosti in slabosti v konceptu izražanja: vsaka razsežnost pa je prilagojena specifični predstavitvi realnosti. Zaradi teh omejitev medijev je n-razsežen prostor vedno predstavljen z zmanjšanjem števila razsežnosti (2R-3R) in združevanjem za sistem tipičnih informacij. Koristnost navideznega okolja se pokaže pri predstavitvi težje razumljivih pojavov, saj je predstavitev vsebin v navideznem okolju veliko bolj prava in razumljiva. To omogoča hitrejše prostorske odločitve, predstavlja podporo raziskovanju, pojasnjevanju, napovedovanju in načrtovanju, pogosto pa prinaša nova spoznanja, ki bi bila v klasičnih obdelavah lahko prezrta.

Sam prostor navideznega okolja je trirazsežen, kar pa ne pomeni, da je predstavitev omejena na le tri razsežnosti. Navadno je zaradi tehnoloških omejitev (tj. raven zaslon) predstavitev praviloma le 2R, vendar je z načinom grafične upodobitve elementov prostora omogočeno zaznavanje prostora. S preskokom iz dvorazsežnega v trirazsežno okolje se okolje resda razširi le za eno razsežnost, vendar pa ta prehod omogoča veliko večjo izbiro za predstavitev prostorskih informacij o vodnih sistemih. To omogoča nadaljevanje raziskovalnih analiz ter pomaga dobiti izboljšani vpogled na problem. Informacijska tehnologija že omogoča natančen in celosten prikaz naravnih, grajenih in socioloških pojavov v realnem prikazu in realnem prostoru ter hkrati vključitev časa. Za pregledovanje navideznega okolja se navadno uporablja računalniški zaslon in druge tehnologije navidezne resničnosti.

Nadalje delo po umeščanju vodnih sistemov v navidezno okolje vodi k uporabi tehnologije navidezne resničnosti in razširjanju načinov zaznavanja navideznega okolja, od čutila vida tudi na druga človeška čutila.

4.2 Koncept navidezne resničnosti

Navidezna resničnost ni nov koncept. Razvoj opreme in razširitev znanja na področju uporabe računalništva za trirazsežno predstavitev prostora omogoča vse širšo uporabo zapletenih tehnologij. Le-te nam omogočajo, da se približamo kompleksnosti realnega sveta, in da kot

človek potujemo skozi prostor in čas. Navidezna resničnost uporablja tehnike, s katerimi se uporabnik lahko popolnoma potopi z informacijami v prostoru. Za učinkovito upodobitev je potrebna kakovostna oprema, ki omogoča, da si slike npr. v letalskem simulatorju, sledijo dovolj hitro, kar daje občutek resničnosti. Med to opremo spada močna računalniška in grafična oprema ter dovolj velike kapacitete za shranjevanje podatkov. Dopolnilen in pomemben faktor so lastnosti uporabnika simulacije izražene kot zmožnost pasivnega sprejemanja informacij iz simulacijskega okolja. To pomeni, da je učinek interakcije računalnik/uporabnik enako pomemben kot sama kvaliteta navidezne resničnosti.

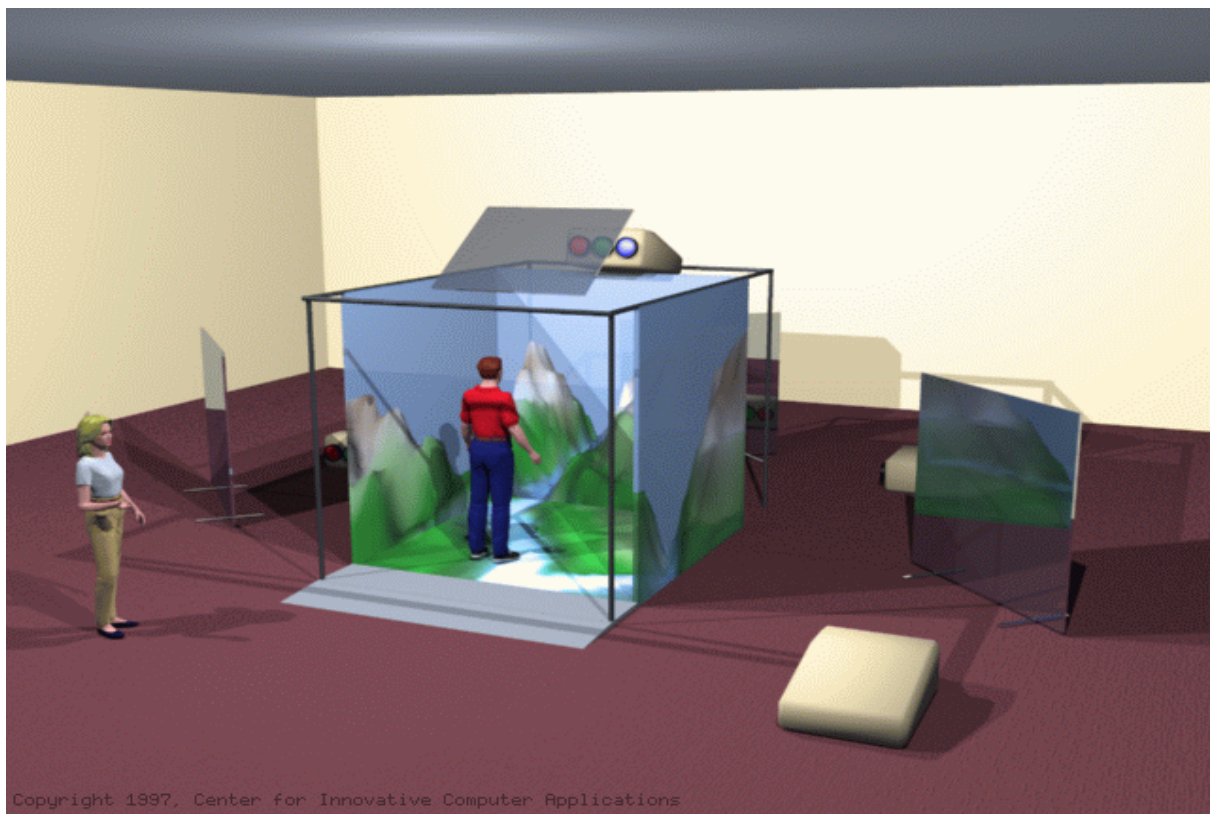
Sistemi navidezne resničnosti (Slika 24, vir: EVL) se razlikujejo v kvaliteti opreme in tehnični lastnosti uporabniških vmesnikov. Če želimo, da se uporabnik dejansko vživi v simulacijo, bi morala biti aktivirana vsa čutila: vid, sluh, dotik in tudi občutek za ravnotežje. Taki sistemi uporabljajo naglavne zaslone, premikajoče se ploskve, zvočnike in rokavice za vzbujaanje tipnih čutil, ipd. Ta oprema je draga in zaenkrat še ni splošno razširjena. Pri sistemih navidezne resničnosti gre navadno za popolnoma umetno oblikovano okolje. S pomočjo osebnih računalnikov pa lahko oblikujemo umetno ustvarjeni prostor (preprosto navidežno resničnost) kar doma ali v pisarni.

Razvoj geografskih informacijskih sistemov in sistemov navidezne resničnosti omogoča tudi izdelavo predstavitev na podlagi obsežnih prostorskih podatkov. Uporaba geografskih informacijskih sistemov in navidezne resničnosti prinaša dve podobni vrsti metod upodabljanja prostorskih podatkov: zaslon je lahko ves čas v povezavi z bazo podatkov ter sledi njihovim spremembam, uporabnik pa po želji izbira pozicijo gledanja, velikost navideznega zaslona ter ima možnost nadzora nad bazo podatkov in izbire načina prikaza podatkov (teksture, senčenje, s pomočjo barvne lestvice). Možnost interakcije med navidežno resničnostjo in podatki geografskih informacijskih sistemov je še vedno v fazi intenzivnega razvoja.

Navidezna resničnost ni dominantna grafična metoda za prikaz prostorskih informacij, saj želi tehnologija ponuditi neposredno potopitev v navidežno okolje z vsemi človekovimi čutili. Že danes pa grafična predstavitev omogoča:

- hiter dostop do podatkov in možnost upravljanja z njimi;

- dinamično raziskovanje podatkov z interaktivno kontrolo;
- prilagajanje podatkov, medtem ko gledamo iz statične pozicije, menjavo pozicije pogleda, medtem ko krmarimo skozi prostor z enakimi podatki ter tudi kombinacijo obeh,
- kreiranje okolja, v katerem lahko opravimo preizkuse raznovrstnih hipotez,
- vključevanje več razsežnosti,
- oblikovanje poljubnih pogledov,
- oblikovanje namišljenih situacij,
- možnost potopitve v navidezen prostor.



Slika 24: CAVE sistem navidezne resničnosti.

Fig. 24: Virtual reality system CAVE.

Zato lahko navidezna resničnost pomaga približati analitično upravljanje s prostorskimi podatki. Tehnike navidezne resničnosti so že dodobra uveljavljene na področju krajinskega planiranja, vojaškega urjenja, video iger, ipd.

4.3 Tehnologije prikazovanja

V razvoju računalniške grafike je bilo izdelanih več tehnologij, ki omogočajo realistično prikazovanje trirazsežnih vsebin v različnih okoljih. Na kratko si oglejmo nekatere.

- **Virtual Reality Modelling Language VRML**

VRML je bil prvi standard (ISO/IEC 14772-1:1997), izdelan za prikaz 3R grafike na svetovnem spletu. VRML v bistvu ni programski jezik v izrecnem pomenu besede, vsaj ne v takem smislu, kot mnogi programerji to mislijo. VRML koda je sestavljena iz opisa 3R scen in predvidenega obnašanja teh scen glede na akcije, ki jih bo sprožil uporabnik. Koda je (kot HTML) zapisana v navadnem ASCII formatu. Ponavadi je sestavljena iz stotih oziroma tisočih poligonov. Vsak gradnik (vozlišče) ima podane lastnosti o geometriji (pravilne in nepravilne oblike), osvetljenosti (usmerjenost, lega, točkovna ali obdajajoča), materialih in teksturah (draperije in rastrski formati). VRML je platformsko neodvisen programski jezik, ki ustvari prizor navidezne resničnosti, skozi katerega se lahko uporabniki »sprehajajo« in sledijo povezavam, podobno kot pri »običajni« spletni strani. V nekaterih kontekstih lahko VRML nadomesti konvencionalne računalniške vmesnike z ikonami, meniji, datotekami in mapami. Tehnologija VRML je v različici 2.0 že široko zastopana v prikazovanju 3R scen na medmrežju (Slika 25, vir: <http://gemma.unimb.si/tower/>).



Slika 25: Prikaz vodnega stolpa v Mariboru v VRML.

Fig. 25: VRML presentation of Water tower in Maribor.

- **X3D**

Leta 2002 je bila na konferenci SIGGRAPH predstavljena prva specifikacija novega standarda, imenovanega X3D - Extensible 3D.

X3D je odprt standard nove generacije za prikaz 3D geometrijskih objektov na svetovnem spletu, ki ga je pripravila skupina Web 3D Consortium. Zaradi slabosti standarda VRML (počasnost in ne razširljivost) so se namreč pri Web 3D Consortium odločili ustanoviti razvojno skupino, ki izdeluje specifikacijo za nov standard. Ker pa se kljub vsemu niso želeli popolnoma odpovedati VRML, so si pri razvoju postavili naslednje cilje (vir: www.web3d.org):

- združljivost z brskalniki in orodji VRML,
- razširitveni mehanizem naj bi omogočal preprosto vpeljavo novih možnosti,
- majhno, preprosto, a učinkovito jedro za najhitrejšo možno podporo X3D,
- podporo drugačnim zapisom, vključujoč XML, za lažjo integracijo z drugimi tehnologijami, prisotnimi na spletu,
- arhitekturo, primerno za hitro posodabljanje specifikacij.

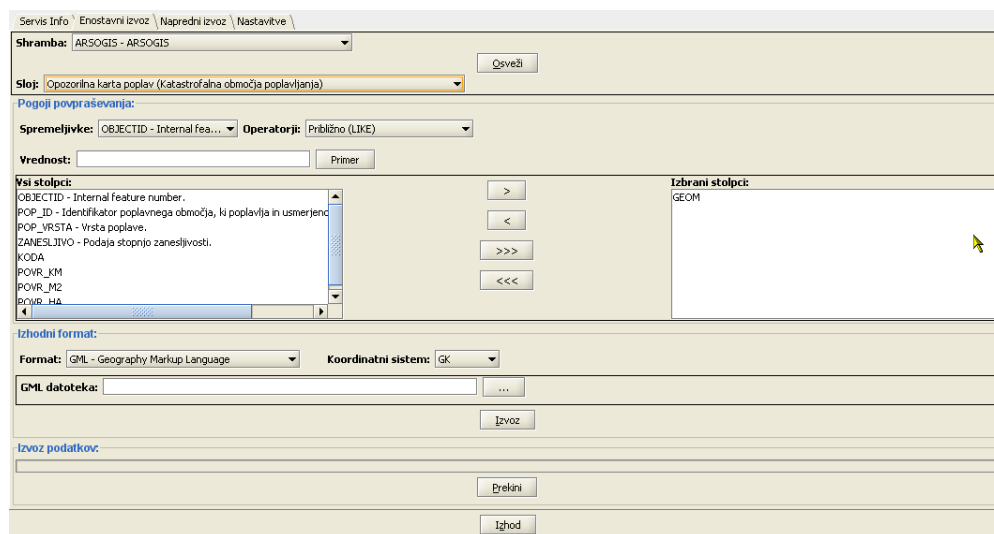
X3D je zasnovan modularno. Glavni modul predstavlja majhno jedro, ki vsebuje majhen nabor vozlišč, namenjenih geometriji in animaciji. Vsebuje mehanizem, ki omogoča preprosto dodajanje novih vozlišč s profili. Z uvedbo profilov je razvijalcem omogočeno, da izdelajo X3D brskalnik, prirejen njihovim potrebam.

- **GML**

GML je angleška tri-črkovna kratica za Geography Markup Language, zemljepisni označevalni jezik in je prirejen označevalni jezik XML za delo z geografskimi pojavi preko spleta. Služi lahko kot modelni jezik geografskih sistemov kakor tudi kot izmenjevalni format geografskih podatkov (Slika 26, vir: ARSO).

Iz jezika GML se je kasneje razvil SGML »Standard Generalized Markup Language«, ki je bil leta 1986 standardiziran s strani organizacije ISO (International Organization for

Standardization - www.iso.org) kot standard ISO 8879. SGML predstavlja osnovo tako za XML kot tudi za HTML, ki je danes najbolj razširjen način zapisa spletnih dokumentov.



Slika 26: Izvoz prostorskih podatkov Agencije RS za okolje v formatu GML.

Fig. 26: Spatial data download of Agency of environment of RS in GML format.

- **Java3D**

Java3D je programski vmesnik (vir: <http://java.sun.com/>), ki omogoča prikazovanje hierarhije razredov. Omogoča izdelavo teles, kontrolo nad animacijo in interakcijo, prav tako pa omogoča natančen nadzor nad vhodnimi napravami, modelom ogledovanja itd. Java3D je aplikativno-usmerjen (angl. application-centric) pristop h gradnji trirazsežnih svetov. Ne aplikacija in ne vsebina nista standardizirani - obe sta spremenljivi! Orodje Java3D API uporabljamo, ko so operacije nad grafično vsebino zapletene in specifične za aplikacijo, zato je Java3D v glavnem namenjen razvijalcem aplikacij.

Uporaba Jave omogoča izdelavo skoraj poljubnih programov, ki se lahko izvajajo v najpomembnejših spletnih brskalnikih in omogočajo poljubno interakcijo z uporabnikom in izdelavo poljubnega uporabniškega vmesnika. Java3D se vedno bolj uveljavlja tudi na področju zabavne elektronike, npr. mobilni telefoniji.

Doktorska disertacija se ne bo ukvarjala s tovrstnimi tehnologijami, saj je poudarek na vodnogospodarskih vsebinah, kljub temu pa sta v raziskovalnem delu bili testirani tehnologiji VRML in GML.

4.4 Uporabniške potrebe pri delu z navideznimi okolji

Trirazsežni objekti so v literaturi prikazani navadno kot aplikacijsko odvisni objekti, kar pomeni, da je prikaz trirazsežnih objektov odvisen od tehnološke rešitve (grafika, topologija, ipd.) navideznega okolja. Splošno prepričanje je, da so najbolj pomembni objekti v urbanem prostoru zgradbe (Grün in Dan, 1997), za katere je bilo izdelanih tudi največ upodobitev v trirazsežnem prostoru. Razpoložljiva literatura pretežno obravnava trirazsežne objekte v urbanih območjih, saj so le-ti verjetno bili za investitorje in gradnjo informacijskih sistemov najbolj zanimivi.

Fuch je leta 1996 objavila poročilo o raziskavah, ki obravnavajo prostorske entitete v 3R modelih mest. Raziskava je vključevala 55 udeležencev seminarja iz Evrope. Obseg raziskav je vključeval pet skupin prostorskih entitet: zgradbe, vegetacijo, prometno omrežje, javne storitve in telekomunikacije. Rezultati raziskave jasno prikazujejo, da uporabniki pretežno uporabljajo (potrebujejo) zgradbe, prometno omrežje in vegetacijo. Dahany (1997) je predlagal pomembne skupine objektov: teren, vegetacija in grajene strukture. Nekateri avtorji (Flick, 1996, Pilouk 1996) so se osredotočili na geometrijske upodobitve. Tempfli (1998) pa se je osredotočal na topografske objekte in raziskoval 3R modele poseljenih območij, ki so vsebovali zgradbe, modele reliefa, ulice, parkirišča, vrtove, razsvetljavo in drevesa.

Zlatanova (1998) je izvedla raziskavo uporabniških zahtev oz. pričakovanj pri uporabi trirazsežnih objektov urbanega okolja v povezavi s 3R GIS, glede geometrične ločljivosti, prostorskih relacij in realističnega prikazovanja. Raziskava je vsebovala naslednje elemente vodnih sistemov:

- vodovodno omrežje (segmente cevi, ventile, hidrante, razvode),
- omrežje za odvajanje odpadne vode (segmente cevi, jaške, ventile, razvode) in
- omrežje za odvajanje padavinske vode (nadzemne kanale, podzemne cevi, prepusti, prispevna območja).

Raziskava med podjetji je pokazala, da sta geometrična ločljivost in nivo abstrakcije pomemben faktor uporabe navideznega okolja. Relacije med objekti so pomembne, saj

določajo različne prostorske operacije, ki jih uporabniki lahko izvajajo v navideznem okolju. Uporabniki so bili enotni, da pregledovanje trirazsežnih objektov zahteva kakovostnejši prikaz, čeprav se je večina vključenih podjetij strinjala, da je prikazovanje trirazsežnih objektov zadovoljivo tudi s trirazsežnimi znaki. Trirazsežni znaki so lahko razdeljeni na več skupin, ki v navideznem okolju prikazujejo lokacijo, obliko in velikost, kot tudi kakovostne in kvalitativne lastnosti realnih zgradb. Postavljeno pa je bistveno vprašanje: Katere zgradbe naj bodo upodobljene s trirazsežnimi znaki? Pričakuje se, da naj bi 3R GIS za potrebe občine omogočal:

- upravljanje prostorskih in ne-prostorskih (pravnih in abstraktnih) objektov,
- prikazovanje pomenskih, geometrijskih in fizikalnih lastnosti prostorskih objektov,
- urejanje 3R prostorskih odnosov,
- podporo za upravljanje medsebojnih relacij med prostorskimi in ne-prostorskimi objekti,
- izražanje prostorskih in ne-prostorskih poizvedb,
- enostavno urejanje prostorskih objektov,
- ustrezen uporabniški vmesnik.

S strani uporabnikov sta bila poudarjena dva pomembna vidika v povezavi s podatki infrastrukture občine:

- pomembni so medsebojni odnosi med prostorskimi in ne-prostorskimi objekti ter,
- potrebna je ustrezna obravnava prostorskih objektov, ki sicer običajno niso vidni v realnem svetu (zakopani transportni vodi, idr.).

4.5 Vodnogospodarske karte in načrti

Razvoj gospodarjenja z vodami vse bolj izpostavlja problem zbiranja in ažuriranja množice opisnih in grafičnih vodnogospodarskih vsebin, kot tudi drugih, z vodami povezanih informacij, potrebnih v vodnogospodarskem načrtovanju. Hkrati se z vsemi dopolnjevanji in posodabljanji vse bolj izpostavlja problem pretoka le-teh, med posameznimi subjekti načrtovanja v prostoru.

Dosedanja praksa prikazovanja vodnogospodarskih tematskih kart je v Sloveniji temeljila le na trenutno še veljavnih Vodnogospodarskih osnovah (1978) in dopolnjevanju vodnogospodarskih vsebin z obstoječimi digitalnim kartam. Ker še ne obstojijo novi načrti upravljanja z vodami, ni mogoče izluščiti ustreznih vsebin objektnih tipov vodnih vsebin. Zato je v nadaljevanju prikazana zgradba standarda za prikaz vodnogospodarskih vsebin v kartah in načrtih, kot to določa DIN 2425, 1983. Upoštevana je 4. izdaja Priročnika 179-DIN, ki upošteva stanje normativov julija 1998. Prikaz vsebin standarda ima izključno vsebinski namen, saj kot veljavni standard predstavlja čvrsto izhodišče, hkrati pa omogoča nadaljnje preverjanje razvrščanja elementov vodnih sistemov umeščenih, v navideznem okolju.

Standardi veljajo za karte in načrte, s pomočjo katerih se predstavljajo vodnogospodarske vsebine. Namen standarda DIN 2425 pa je bil, postaviti enolične kriterije za opis vsebin v naslednjih kartah in načrtih:

- vodnogospodarske osnove in načrti (načrti upravljanja s povodji),
- prikaz posebnih vodnogospodarskih vsebin (vodovarstvenih območij, zavarovanih območij, retenzijskih površin ipd.),
- druga vodnogospodarska dokumentacija (npr. zasnove sistemov, predhodne študije, ipd.),
- posebni načrti (poplavne linije, načrti za podelitev vodnih pravic (koncesioniran odsek)),
- minimalna vodnogospodarska dokumentacija in skice (npr. za izvedbo interventnih del).

Glede na vsebino standard ločuje:

- karte in načrte za posamezen namen (npr. padavinske karte, karte kakovosti) ali za prikaz naprav (vodomerne postaje, čistilne naprave, ipd.), ter
- večnamenski prikaz stanja oziroma (funkcionalno povezanih) naprav.

Možna pa je še nadaljnja delitev:

1. glede na spremenljivost po času, kadar se prikažejo:

- časovni vidiki (zgrajeno, v izgradnji, bodoče tj. evidentirano, a še brez določenega uporabnika),
- časovna obdobja (stanje, bodoče, pričakovano),
- spremembe v časovnih obdobjih (trendi);

2. glede na prostorsko razsežnost:

- pregledne državne karte, karte regij, povodij ipd.,
- manjši izrez (obravnavanega) prostora,
- prikaz izbranih vsebin na topografskih kartah.

Pri uradnih kartah mora ostati prikaz strokovnih tematik jasno razviden, grafični prikaz pa mora omogočiti ločljivost tako pri črno-beli kot pri barvni predstavitvi. Po pravilu velja, da ima prednost predstavitev s površinami pred predstavitvijo z linijami oziroma barvni prikaz pred črno-belimi. Grafični prikaz se prilagaja merilu kart.

Da bi lahko vpeljali klasifikacijo vodnih teles in njihovih elementov, izhajamo v razvrščanju elementov vodnih sistemov v navideznem okolju iz standarda DIN2425. Podrobneje je standard DIN2425 prikazan v Prilogi A.

Standard DIN 2425 je standard za podrobnejši prikaz vodnogospodarskih vsebin na kartah za različne potrebe vodnogospodarske stroke in drugih uporabnikov. Zastavljen je koncept, ki ne izhaja iz topografske kartografije temveč iz tematskih kart. Zaradi prikaza uporabljenega pristopa so predstavljene vse vsebine standarda. V doktorski disertaciji imena posameznih vsebin ne vsebujejo opisov, čeprav so le-ti dodatno razvrščeni. V standard so vključeni samo vodnogospodarski objekti, ki jih po naši zakonodaji razumemo kot vodne zgradbe in naprave v splošni rabi (tj. infrastruktura na področju vodnega gospodarstva oz. krajše vodnogospodarska infrastruktura), vendar jih bo možno uporabiti tudi za druge primere posegov v prostor (v vode), ki predstavljajo objekte v posebni rabi. Predlagamo, da se v nadaljevanju uporabljajo struktura in objekti iz tega standarda, kadar se nanašajo na vodne zgradbe in naprave ter vodne pojave.

Seveda pa je možna še podrobnejša specifikacija, če bi bila za posamezne namene potrebna še členitev glede na tip (npr. Kraški izvir), funkcijo (visokovodni preliv, pomožne in glavne

zapornice,...), status (raba v javnem interesu, skupna raba (npr. namakalne skupnosti), mešana raba, posebna raba), itd. Možnih delitev je veliko, zato je pred izdelavo takšnih delitev zahtevano, da se opredeli namen in uporabnika tako strukturiranih opisov, namenjenih npr. za lastnika, za upravljavca, za upravo, ipd. Definicij nekaterih v doktorski disertaciji uporabljenih objektnih tipov DIN 2425 ne vsebuje, zato sem za potrebe te naloge to moral pripraviti sam.

4.6 Modeli vodnih sistemov v trirazsežnem prostoru: problemska področja

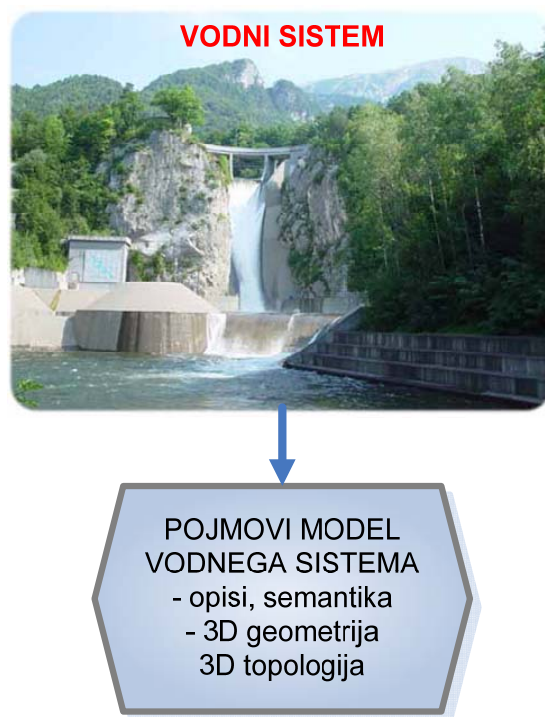
Vodni sistem, ki je v izhodišču opredeljen z naravnimi zakonitostmi, zapisanimi s fizikalnimi, kemičnimi, biološkimi, idr. pravili, je z obstoječimi orodji navadno pomanjkljivo ponazorjen, saj je potrebno v učinkoviti opis gospodarjenja z vodami oziroma z vodnimi sistemi vključiti tudi zanje veljavna ekonomska in pravna pravila. To pa pomeni, da se v celostno gospodarjenje z vodami vključujejo še strokovnjaki iz številnih drugih področij, za katere pa ni nujno, da znajo razbrati npr. tehnično-tehnološke načine zapisov (in seveda obratno). Razvoj, usmerjen v prehod od obstoječih podatkovnih struktur, ki opredeljujejo model vodnega sistema z grafičnimi opisi v dveh razsežnostih, v navidezno okolje, je pogojen tudi z najnovejšimi spoznanji o vodnih sistemih, in vodi k prikazovanju (simuliranju) realnih naravnih pojavov in vplivov dogovorjenih (pravnih, ekonomskih ipd.) pravil na njih.

Za prikazovanje izvornih in modeliranih podatkov o vodnih sistemih so se v svetu uveljavile različne metode in pristopi, ki pa so ozko specializirane le na prikaz določenih elementov ali pojavov v vodnih sistemih, kot je npr. trirazsežna upodobitev propagacije toka vode v strugi. Raziskave pa vodijo v združevanje elementov in pojavov modela vodnih sistemov z drugimi elementi, ki predstavljajo realni in abstraktni prostor na katerega vodni sistemi vplivajo (in obratno). Takšen pristop v navideznem okolju pa omogoča iskanje novih spoznanj, ki bodo potrebna za učinkovito trajnostno gospodarjenje z vodami v prihodnje.

Razvoj, uporaba in vzdrževanje modelov vodnih sistemov v trirazsežnem prostoru odpira širok nabor vprašanj glede izbora trirazsežnega modela, zbiranja podatkov, analiz, upravljanja s podatki, upodabljanja in oddaljenega dostopa do prostorsko umeščenih podatkov. Nekatera

ključna raziskovalna področja so v nadaljevanju prikazana v obsegu, ki je potreben za opis dosežkov te naloge.

Pojmovni model: Splošno razumevanje pojmovnega modela (in pripadajočega logičnega modela) je ključni element razumevanja navideznega okolja in vsebovanega modela vodnega sistema (Slika 27). Pojemni model združuje informacije o pojmi (opisih, semantiki), trirazsežni geometriji in trirazsežnih prostorskih relacijah (3R topologija). Pojemni model omogoča načine opisovanja objektov iz realnega okolja in prostorske relacije med njimi. Modeli vodnih sistemov morajo zadostiti pogojem 3R topologije in 3R upodabljanja v realnem času, kar je v literaturi le slabo raziskano (Koutek, 2003).



Slika 27: Pojemni model vodnega sistema.

Fig. 27: Comprehension model of water system.

Zbiranje podatkov: Zajem podatkov v 3R precej poveča ceno pridobivanja podatkov v primerjavi z 2R zajemom podatkov. Navkljub razvoju v avtomatskem zaznavanju 3R objektov je ročno delo še vedno prevladujoče. Metode izdelave modelov z združevanjem različnih virov podatkov npr. tehnik avtomatskega zajema podatkov (geometrija in slike za texture), pravila in algoritmi o združljivosti podatkov, algoritmi avtomatske gradnje 3R

topologije ipd., so široko zastopane v literaturi predvsem glede zgradb, manj pa s stališča naravnega okolja.

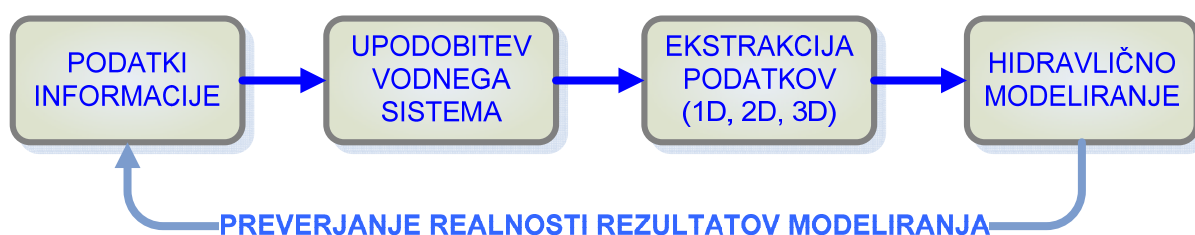
Prostorska analiza: Medtem ko so tematske analize in 2R prostorske analize dobro vsebovane v literaturi in v komercialnih produktih, pa so 3R prostorske analize še vedno v začetni, intenzivni fazi razvoja. Prostorske relacije, kot so npr. vključitev, bližina, enakost, usmerjenost, presek, združevanje, so temeljne za učinkovite prostorske operacije med posameznimi elementi v trirazsežnem prostoru. Tretja razsežnost tudi bistveno povečuje število, prepletenost in zapletenost vseh možnih relacij v primerjavi z dvorazsežnim prostorom.

4.7 Faze hidravličnega modeliranja

Hidravlično modeliranje je zelo širok pojem, saj zajema vrsto področij. Sem spada tako reševanje problemov odprtih vodotokov in kanalov, kot tudi zaprtih vodnih tokov in podzemnih vodnih tokov. Pri odprtih vodotokih se obravnava hidravliko rečnih korit in hidrotehničnih objektov, kot so preliv, jezovi, podslapja, zadrževalniki, prepusti, mostovi, nasipi ipd. Med zaprte sisteme štejemo vodovode, cevovode, tlačne tunele ipd. Podzemni tokovi se pojavljajo v zrnatih materialih ali v razpoklinah, glede na tvorbo vodne površine pa gre lahko za tok s prosto gladino ali tok v zaprtih sistemih. Prav tako se s pomočjo modeliranja rešujejo hidravlični problemi na morju in ob obali, zato sem štejemo pristanišča, mostove, protipoplavne objekte, objekte za zaščito pred udarno močjo valovanja ipd. Vse te podsisteme pa v celoto povezuje vodni krog ali pa, pri grajenih sistemih, zasnova vodnih tokov.

V navidezno okolje umeščeni modeli vodnih sistemov so neposredno uporabni v različnih fazah hidravličnega modeliranja, saj je za hidravlično modeliranje potrebno vzpostaviti shemo modela in pridobiti ustrezno geometrijo zemeljskega površja, zgradb, naprav, ureditev. Rezultate hidravličnega modeliranja, tj. razsežnost vodnih teles in fizikalne lastnosti vodnih teles, pa lahko ponovno prikažemo v modelu vodnih sistemov umeščenih v navidezno okolje. Ne glede na to, ali uporabljamo za reševanje problemov fizične ali matematične hidravlične

modele, je pomembno, da enovito okolje omogoča tako ekstrakcijo geometrijskih podatkov in drugih podatkov za opis vodnega režima kot tudi prikaz rezultatov modeliranja (Slika 28). Ko po izvedenem hidravličnem modeliranju v navidezno okolje umestimo rezultate hidravličnega modeliranja, lahko procesi validacije opozorijo na vsebine, ki niso bile zajete, ker se je privzelo, da je njihov vpliv zanemarljiv, ali pa celo, ker jih nismo poznali. Gre torej za pridobivanje novih znanj oziroma informacij.



Slika 28: Ciklični pristop hidravličnega modeliranja.

Fig. 28: Hydraulic modelling cycle.

S fizičnim modelom običajno ponazorimo primer iz narave v pomanjšanem merilu za konkreten primer, zato je težko na tem modelu opraviti kasneje večje spremembe. V takih primerih so bistveno primernejši matematični modeli, kjer lahko v fazi modeliranja preizkušamo različne variante vodovarstvenih objektov, hidroenergetskih objektov ipd. Kljub temu pa je jasno, da en pristop ne more izpodriniti drugega. Matematični model lahko namreč poda odgovore le na vsebine oz. procese, ki so bile lahko z matematičnimi sredstvi opisane.

Kljub temu, da so si modelirani problemi med seboj zelo različni, pa je osnovni potek modeliranja enak za vsa področja, ne glede na to, ali gre za matematični ali fizični model. Za uspešno delo je potrebno natančno določiti problem, cilj modeliranja ter robne in začetne pogoje. Tako bo lahko model prinesel želene rezultate in odgovore. V izhodiščni fazi hidravličnega modeliranja je treba najprej pravilno vzpostaviti in voditi evidenco entitet v prostoru, ki je podlaga za izdelavo hidravličnega modela. Na podlagi ustrezno vodene evidence entitet se lahko ustrezno vzpostavi hidravlični model in sledi vsem fazam modeliranja. Zato so vodeni geometrijski podatki o elementih hidravličnega modela zelo pomembni.

Pred začetkom oblikovanja hidravličnega modela je treba natančno opredeliti probleme oz. vprašanja, na katere pričakujemo odgovore, lastnosti npr. toka s prosto gladino, toka pod tlakom ipd. Model (še posebej matematični) namreč lahko odgovori le na vprašanja, za obravnavo katerih je bil zgrajen.

Ali je možno pričakovati, da pridobimo znanja oz. informacije tudi izven meja, čeprav je bil model vodnega sistema zgrajen le za točno določeno obravnavan primer? Smatram, da lahko! Če so rezultati umeščeni v informacijsko okolje, iz katerega je mogoče ponoviti cikel hidravličnega modeliranja z drugo metodo in v enovitem okolju ter primerjati rezultate in hkrati vzpostaviti asociacije/relacije z drugimi modeli v prostoru, je možno iskati nova znanja, kar je osnovni pristop znanstvenega dela.

V navidezno okolje umeščeni modeli vodnih sistemov se vključujejo v vsako fazo izgradnje hidravličnega modela. Zato so v nadaljevanju opisane posamezne faze, saj so informacije in podatki vsake faze ključnega pomena za modeliranje bistvenih lastnosti toka vode v realnem svetu.

4.7.1 Podatki in informacije

Ko je problem zaznan in definiran, je prvi korak v postopku modeliranja zbiranje podatkov. Potrebni podatki za model se delijo na podatke o geometriji in na hidravlične podatke. Zaradi raznolikosti vodnih tokov bo v nadaljevanju obravnavan le tok vode v vodotoku. Podatki o geometriji opisujejo prostor v katerem se lahko nahaja voda (struga in obvodni teren, zgradbe, naprave, ureditve) in vključujejo oceno stanja površine, npr. hrapavosti. Informacije pa so rezultat obdelave, dela s podatki in organiziranja podatkov na način, ki uporabniku podajajo znanje, npr. zabeleženo stanje gladin ob visokih pretokih vodotoka, ipd.

Na osnovi natančno formuliranega bistva problema, gonilnih sil ter ocene sprejemljivih poenostavitev in predpostavk lahko začnemo z zbiranjem podatkov, potrebnih za izdelavo modela. Najprej je potrebno zbrati in obdelati geometrijske podatke, npr. o hidrografski mreži, strugah in poplavnih površinah ob vodotoku. Podatki o zemeljskem površju so lahko

pridobljeni neposredno iz elementov vodnih sistemov, umeščenih v navidezno okolje. Četudi nimamo v modelu podatkov o vodnih površinah, nam konfiguracija zemeljskega površja v navideznem okolju omogoča presojo smeri in jakosti toka vode in ponazoritev opazovanih vodnih pojavov.

Primarni vir podatkov lahko predstavljajo različne tehnologije zajema podatkov npr. klasične geodetske meritve, radarsko snemanje, aerofoto in satelitsko snemanje, LIDAR snemanje, ipd. Te metode navadno prinašajo zadovoljive rezultate, ko gre za modeliranje zemeljskega površja, ne pa tudi za opis struge. Praksa je pokazala, da so v primeru, če želimo izvesti natančno hidravlično analizo, razpoložljivi podatki premalo natančni. Zato si lahko pomagamo z dodatno izmerjenimi prečnimi profili vodotoka, kar bistveno izboljša natančnost na samih lokacijah prečnih profilov, ne reši pa problema natančnosti celotnega digitalnega modela (vodnega prostora). Tehnika, ki danes zagotavlja zelo natančno topografsko podobo terena ožjega območja, je lasersko skeniranje (tehnologija LIDAR). Z njo dosežemo natančnost do nekaj centimetrov ter lahko posnamemo tudi konfiguracijo terena pod vodno gladino do globine nekaj metrov (Gosar et al., 2006a).

V naslednji fazi so potrebni podatki, ki opisujejo lastnosti vodnega toka, kar podajo meritve vodostaja, meritve gladin, pretoka in hitrosti vode. Ko obravnavamo poplavalne situacije, je dobro poznati sledi predhodnih visokih voda oz. območja, ki so bila poplavljeni v teh primerih. Ti podatki so nujno potrebni za nadaljnje faze hidravličnega modeliranja. Za posamezne pretoke potrebujemo tudi zunanje in notranje robne pogoje. Vrsto in obseg potrebnih podatkov določimo glede na namen naloge. Natančnost pa ni odvisna le od količine in kakovosti podatkov, temveč tudi od njihove merodajnosti za konkreten primer.

Vse potrebne vhodne podatke je možno v navideznem okolju združiti na enovit način, hkrati pa še preveriti njihovo natančnost in medsebojno združljivost, kar povečuje verodostojnost vseh naslednjih faz hidravličnega modeliranja.

4.7.2 Izbira primernega modela

Na podlagi definicije problema in podatkov, ki so na voljo, se izbere ustrezna vrsta modela. Najprej se je potrebno odločiti med fizičnim ali matematičnem modelom. Vsak ima svoje prednosti in pomanjkljivosti.

Fizični model je pomanjšan prikaz situacije v naravi brez popačenj, razen če se namenoma izbere npr. po višini popačen (distorziran) model. Taki modeli omogočajo prikaz in s tem dobro predstavo procesov v toku, zato se uporabljajo pri načrtovanju objektov na vodotoku. S simulacijami na fizičnih modelih lahko ugotavljamo vplive teh objektov na vodni tok in na podlagi teh ugotovitev sprejemamo odločitve za optimizacijo objektov v efektivnem kot tudi varnostnem smislu. Oblikujemo lahko tako trdna ostenja kot tudi korita z gibljivim dnom, da lahko v simulaciji upoštevamo prodonosnost. Slabost fizičnih modelov je predvsem zahtevna in dolgotrajna izdelava. Prav tako se težave pojavljajo zaradi modelne istovetnosti tekočine (vode) in sil, ki nastajajo pri tem. Sile zaradi viskoznosti v naravi nimajo posebnega vpliva in jih običajno lahko zanemarjamo, česar pa ne smemo storiti pri modelih v pomanjšani obliki. V času, ko je postavljen fizični model, je treba izvesti resnično vse potrebne meritve, saj po odstranitvi le-tega nikoli več ne dobimo identičnih pogojev. Seveda je drugače pri matematičnih modelih, ki jih lahko shranimo na nekem mediju, zato lahko kadarkoli ponovimo ali dodamo simulacije.

Kot omenjeno, imamo na drugi strani matematične modele različnih zmožnosti analiziranja. Ti modeli so bistveno cenejši, izvajanje simulacij pa je hitrejše. Glede na zahtevnost problema in zahtevano natančnost rezultatov se lahko odločimo za eno-, dvo- ali trirazsežni model. Matematični model je v bistvu računalniški program, sestavljen iz dveh delov. Prvi del je sklop matematičnih enačb, ki opisujejo hidravlične pojave, zapisanih v numeričnem algoritmu. Ta del, navadno uporabniku nedostopen, je preko vmesnikov, ki predstavljajo drugi del, povezan z uporabnikom. Tako je drugi del namenjen vnosu hidravličnih in geometrijskih podatkov in prikazu rezultatov obravnavanega odseka. Prav tako kot s fizičnim modelom simuliramo pojave, le da lahko spreminjamo geometrijske in hidravlične podatke hitreje, enostavnejše in precej bolj ekonomično. Matematični modeli so danes že izjemno

dobro razviti in omogočajo obravnavanje najrazličnejših problemov, med drugim tudi račun gladin in hitrosti vode v rečnih koritih in poplavnih območij, račun poplavnih tokov, hidravliko objektov na vodotoku ipd. Žal pa matematični modeli lahko prikažejo le procese, katerih enačbe so zapisane v algoritmu, ne pa morebitnih procesov, ki se lahko izkažejo kot pomembni. V nadaljevanju so prikazana osnovna načela fizičnih in matematičnih modelov, saj je povezanost med modeli vodnih sistemov, umeščenimi v navidezna okolja, potrebna in neločljiva.

4.7.2.1 Fizični hidravlični modeli

Fizični model je običajno pomanjšan prikaz situacije vodnega toka. Robni pogoji (dno kanala, brežine), gorvodni robni pogoj pretoka in tokovno polje morajo biti pomanjšani na ustrezen način. Fizični hidravlični modeli se običajno uporabljajo v fazi načrtovanja objekta, da bi optimizirali gradnjo in zagotovili varno delovanje objekta. Imajo tudi pomembno vlogo v procesu sprejemanja odločitev - omogočajo namreč prikaz in s tem boljšo predstavo o lastnostih tokovnega polja, kar je v veliko pomoč osebam izven inženirske stroke, ki odločajo oziroma iščejo najbolj ustrezno rešitev.

V gradbeništvu je fizični hidravlični model praviloma manjši od prototipa (konstrukcije v naravni velikosti), nekatere uporabe modelnih raziskav pa lahko celo zahtevajo uporabo modelov večjih od prototipa. V vsakem primeru je treba model preučiti v laboratoriju pri nadzorovanih pogojih. Hidravlični modeli, so lahko zgrajeni v nepopačenem ali popačenem (distorziranem) modelnem merilu. Popačeni modeli imajo različni modelni merili za navpične in vodoravne razsežnosti, nepopačeni pa imajo isto merilo za vse razsežnosti na modelu. Druga delitev fizičnih modelov je na tiste z nepremičnim (fiksni) ostenjem in na tiste z gibljivim dnom. Slednji se uporabljajo pri raziskavah, ki se ukvarjajo s preučevanjem premeščanja plavin zaradi vodnega toka in s pojavi preoblikovanja morfologije rečnega korita (erozija, odlaganje proda).

Hidravlično modeliranje ne sme biti oddvojeno od teorije mehanike tekočin. Da bi bile eksperimentalne raziskave učinkovite in uporabne, morajo slediti teoretičnim smernicam, ki izhajajo iz osnovnih hidravličnih principov, in teoriji o hidravlični modelni podobnosti.

Hidravlična modelna podobnost

Fizični hidravlični modeli se glede na pogoje v laboratoriju zgradijo v izbranem modelnem merilu. Ustrezna točnost na modelu pridobljenih rezultatov je dosežena le takrat, če je dokazano, da veljajo zakonitosti o podobnosti pojava v naravi in na modelu. Mehanska podobnost modela in prototipa je osnovni pogoj, da so količine, merjene na fizičnem modelu, smiselne tudi po preračunu iz modela v naravo.

Hidravlične razmere na fizičnem modelu so podobne tistim na prototipu, kadar model izkazuje podobnost oblike (*geometrijska podobnost*), podobnost gibanja (*kinematična podobnost*) in podobnost sil (*dinamična podobnost*) (Chanson, 1999).

Geometrijska podobnost

Geometrijska podobnost se nanaša na enakost razmerij med linearnimi dimenzijami na modelu in linearnimi dimenzijami v naravi. Geometrijsko linearno merilo modela prikazuje, kolikokrat so dimenzije modela pomanjšane v primerjavi s prototipom. Izračuna se po enačbi:

$$\lambda_L = \frac{L_m}{L_n} = \frac{L_{m,1}}{L_{n,1}} = \frac{L_{m,2}}{L_{n,2}} \quad (2)$$

kjer sta:

L_m ... dolžina na modelu,

L_n ... dolžina v naravi.

Pri popačenih (distorziranih) modelih je treba upoštevati dve geometrijski linearni merili: eno za vodoravne razsežnosti in drugo za navpične razsežnosti. Izračuna se ju po enačbah:

$$\lambda_{x,y} = \frac{L_m^{x,y}}{L_n^{x,y}} = \frac{L_{m,1}^{x,y}}{L_{n,1}^{x,y}} = \frac{L_{m,2}^{x,y}}{L_{n,2}^{x,y}} \quad (3)$$

$$\lambda_z = \frac{L_m^z}{L_n^z} = \frac{L_{m,1}^z}{L_{n,1}^z} = \frac{L_{m,2}^z}{L_{n,2}^z}$$

kjer so:

$\lambda_{x,y} \dots$ geometrijsko linearno merilo modela za horizontalne razsežnosti,

$\lambda_z \dots$ geometrijsko linearno merilo modela za vertikalne razsežnosti,

$L_m^{x,y} \dots$ dolžina na modelu,

$L_m^z \dots$ višina na modelu ,

$L_n^{x,y} \dots$ dolžina v naravi,

$L_n^z \dots$ višina v naravi.

Kinematična podobnost

Dve gibanji sta kinematično podobni, kadar se ohranjajo enaka razmerja med karakterističnimi hitrostmi na modelu in karakterističnimi hitrostmi v naravi oziroma, kadar so tokovne slike gibanja na modelu in v naravi geometrijsko podobne.

Razmerje hitrosti se izračuna po enačbi:

$$\lambda_v = \frac{v_m}{v_n} = \frac{v_{m,1}}{v_{n,1}} = \frac{v_{m,2}}{v_{n,2}} \quad (4)$$

kjer sta:

$v_m \dots$ hitrost na modelu,

$v_n \dots$ hitrost v naravi.

Dinamična podobnost

Dve gibanji sta dinamično podobni, kadar se ohranjajo enaka razmerja med silami, ki vplivajo na gibanje na modelu in v naravi, oziroma kadar so na modelu in v naravi enaka razmerja med masami predmetov, ki so vpletena v gibanje.

Razmerje sil se izračuna po enačbi:

$$\lambda_F = \frac{F_m}{F_n} = \frac{F_{m,1}}{F_{n,1}} = \frac{F_{m,2}}{F_{n,2}} \quad (5)$$

kjer sta:

F_m ... aktivna sila na modelu,

F_n ... aktivna sila v naravi.

Razmerja med preostalimi pomembnimi fizikalnimi količinami v naravi in na modelu – izpeljana modelna merila

Razmerja med dolžinami, hitrostmi in silami so osnovni trije koeficienti oziroma modelna merila, ki opisujejo geometrijsko, kinematično in dinamično podobnost. Iz teh ključnih enačb se lahko izpelje mnoge druge faktorje oziroma merila drugih veličin (Preglednica 1)

Preglednica 1: Modelna merila.

Table 1: Model scales.

KOLIČINA	RAZMERJE
POVRŠINA	$\lambda_A = \frac{A_m}{A_n}, \lambda_A = \lambda_L^2$
PROSTORNINA	$\lambda_V = \frac{V_m}{V_n}, \lambda_V = \lambda_L^3$
ČAS	$\lambda_t = \frac{t_m}{t_n} = \frac{(L_m/v_m)}{(L_n/v_n)} = \frac{L_m}{L_n} \cdot \frac{v_n}{v_m}, \lambda_t = \frac{\lambda_L}{\lambda_v}$
POSPEŠEK	$\lambda_a = \frac{a_m}{a_n} = \frac{(F_m/m_m)}{(F_n/m_n)} = \frac{(F_m/(\rho_m \cdot V_m))}{(F_n/(\rho_n \cdot V_n))} = \frac{F_m}{F_n} \cdot \frac{\rho_n}{\rho_m} \cdot \frac{V_n}{V_m} = \frac{\lambda_F}{\lambda_\rho \cdot \lambda_V}, \lambda_a = \frac{\lambda_F}{\lambda_\rho \cdot \lambda_L^3}$

Preglednica 1...nadaljevanje

KOLIČINA	RAZMERJE
PRETOK	$\lambda_Q = \frac{Q_m}{Q_n} = \frac{v_m \cdot A_m}{v_n \cdot A_n} = \frac{v_m}{v_n} \cdot \frac{A_m}{A_n}, \lambda_Q = \lambda_v \cdot \lambda_L^2$
TLAK	$\lambda_p = \frac{p_m}{p_n} = \frac{(F_m/A_m)}{(F_n/A_n)} = \frac{F_m}{F_n} \cdot \frac{A_n}{A_m}, \lambda_p = \frac{\lambda_F}{\lambda_L^2}$

Indeks m označuje količine na modelu, indeks n označuje količine na prototipu (naravna velikost).

Zakoni modelne podobnosti

Tradicionalne modelne raziskave se izvajajo z uporabo istega medija, to je vode, tako v naravi kot na geometrijsko podobnih modelih. Pri geometrijsko podobnih modelih je resnična dinamična podobnost dosežena samo takrat, kadar imajo vsi izpeljani brezdimenzijski parametri enako vrednost na modelu in prototipu. Torej mora veljati:

$$Eu_m = Eu_n; \quad Fr_m = Fr_n; \quad Re_m = Re_n; \quad We_m = We_n; \quad Ma_m = Ma_n \quad (6)$$

V praksi je zato težko zadostiti vsem kriterijem modelne podobnosti. Pri večini hidravličnih situacij je mogoče doseči geometrijsko in kinematično modelno podobnost, dinamične pa ne v celoti. Rezultati modeliranja so zato dovolj natančni zgolj v območjih, ko v takšni meri prevladuje ena gonilna sila (težnost, tlaki, površinska napetost), da je vpliv drugih zanemarljiv.

Frouddov zakon

Frouddov zakon modelne podobnosti izhaja iz predpostavke, da pri gibanju vode prevladuje sila težnosti. Model izpolnjuje kriterij Frouddovega zakona, če je Frouddovo število na modelu in v naravi enako:

$$Fr_m = Fr_n \quad (7)$$

Iz te enačbe izhajajo ostala razmerja oziroma merila veličin:

Razmerje hitrosti:
$$\lambda_v^{Fr} = \frac{v_m}{v_n} = \frac{Fr_m \cdot \sqrt{g_m \cdot L_m}}{Fr_n \cdot \sqrt{g_n \cdot L_n}} = \sqrt{\frac{g_m \cdot L_m}{g_n \cdot L_n}} = \sqrt{\frac{L_m}{L_n}}$$
$$\lambda_v^{Fr} = \sqrt{\lambda_L} \quad (8)$$

Razmerje časa:
$$\lambda_t^{Fr} = \frac{\lambda_L}{\lambda_v} = \frac{\lambda_L}{\sqrt{\lambda_L}}$$
$$\lambda_t^{Fr} = \sqrt{\lambda_L} \quad (9)$$

Učinek težnosti je skoraj vedno pomemben pri pojavih, kjer prihaja do medsebojnega vpliva dveh tekočin z različno gostoto (običajno gre za zrak in vodo ali pa mešanico vode in sedimentov) in pri toku s prosto gladino (vodotoki, valovanje).

Značilni primeri, kjer ima velik vpliv na gibanje tekočine gravitacija in kjer je smiselna uporaba Froudovega zakona modelne podobnosti, so torej:

- o tok s prosto gladino v vodotokih,
- o premeščanje plavin (pojav se preučuje na ti. modelih z gibljivim dnem),
- o tok med mostnimi oporniki,
- o tok čez preliv ali jez,
- o površinski valovi (npr. pri modelih valolomov ali ladij; izjema so kapilarni valovi).

Tipična uporaba Froudovega zakona modelne podobnosti se zato pojavlja v primerih, ko so trenjske izgube majhne in je tok izrazito turbulenten (Chanson, 1999).

Reynoldsov zakon

Reynoldsov zakon izhaja iz predpostavke, da je glavna sila, ki je značilna za gibanje, viskozna sila. Model izpolnjuje kriterij Reynoldsovega zakona, če sta Reynoldsovi števili na modelu in v naravi enaki:

$$Re_m = Re_n \quad (10)$$

Iz te enačbe izhajajo ostala razmerja oziroma merila veličin:

Razmerje hitrosti:

$$\lambda_v^{\text{Re}} = \frac{v_m}{v_n} = \frac{\text{Re}_m \cdot \mu_m / (L_m \cdot \rho_m)}{\text{Re}_n \cdot \mu_n / (L_n \cdot \rho_n)} = \frac{\mu_m}{\mu_n} \cdot \frac{L_n \cdot \rho_n}{L_m \cdot \rho_m}$$

$$\lambda_v^{\text{Re}} = \frac{\lambda_\mu}{\lambda_L \cdot \lambda_\rho} \quad (11)$$

Razmerje časa:

$$\lambda_t^{\text{Re}} = \frac{\lambda_L}{\lambda_v} = \frac{\lambda_L \cdot \lambda_L \cdot \lambda_\rho}{\lambda_\mu}$$

$$\lambda_t^{\text{Re}} = \frac{\lambda_L^2 \cdot \lambda_\rho}{\lambda_\mu} \quad (12)$$

Vse realne tekočine imajo neko viskoznost, zato je pri načrtovanju poljubnega hidravličnega modela treba upoštevati možni vpliv viskoznega striga. Preprost primer, kjer kot aktivni sili nastopata le viskoznost in vztrajnost, je premikanje podmornice na globini, ki ne povzroča površinskih valov. Drug primer je potovanje letala s hitrostjo, ki je prenizka, da bi bilo treba upoštevati stisljivost zraka. V enaki kategoriji je tudi tok v cevovodih, v katerih je režim toka v prehodnem območju med laminarnim in turbulentnim režimom. Za cevovode velja, da gibanje opisuje potek energijske črte, ne pa padec cevi.

Zelo majhna Reynoldsova števila po definiciji določajo tokove, v katerih prevladujejo viskozne sile, vztrajnostne reakcije pa so zanemarljive.

Eulerjev zakon

Eulerjev zakon modelne podobnosti izhaja iz predpostavke, da pri gibanju vode prevladujejo izključno sile tlaka, vpliv viskoznosti in težnosti pa je zanemarljiv. Model izpolnjuje kriterij Eulerjevega zakona, če je Eulerjevo število na modelu in v naravi enako:

$$Eu_m = Eu_n \quad (13)$$

Iz te enačbe izhajajo ostala razmerja oziroma merila veličin:

Razmerje hitrosti:
$$\lambda_v^{Eu} = \frac{v_m}{v_n} = \frac{Eu_m \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p_m / \rho_m}}{Eu_n \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta p_n / \rho_n}} = \sqrt{\frac{\Delta p_m}{\Delta p_n} \cdot \frac{\rho_n}{\rho_m}} = \sqrt{\lambda_p \cdot \lambda_\rho} = \sqrt{\frac{\lambda_F}{\lambda_L^2} \cdot \lambda_\rho}$$

$$\lambda_v^{Eu} = \frac{\sqrt{\lambda_F \cdot \lambda_\rho}}{\lambda_L} \quad (14)$$

Razmerje časa:
$$\lambda_t^{Eu} = \frac{\lambda_L}{\lambda_v} = \frac{\lambda_L \cdot \lambda_L}{\sqrt{\lambda_F \cdot \lambda_\rho}}$$

$$\lambda_t^{Eu} = \frac{\lambda_L^2}{\sqrt{\lambda_F \cdot \lambda_\rho}} \quad (15)$$

Eulerjevo število je pomembno zlasti pri modelih zaprtega tekočinskega sistema, kjer je turbulenca polno razvita. V tem primeru so sile viskoznosti, težnosti in površinske napetosti zanemarljive v primerjavi s silami vztrajnosti. Ker tlaki narekujejo celotno tokovno situacijo, dobi sila tlaka vlogo neodvisne spremenljivke. To pa je v nasprotju z večino tekočinskih pojavov, kjer je sila tlaka odvisna od gibanja in tako v vlogi odvisne spremenljivke. Takšno modelno podobnost je torej možno uporabiti le za kratke modele z velikimi spremembami tlakov.

Webrov zakon

Webrov zakon izhaja iz predpostavke, da ima najpomembnejši vpliv na gibanje površinska napetost. Model izpolnjuje kriterij Webrovega zakona, če je Webrovo število na modelu in v naravi enako:

$$We_m = We_n \quad (16)$$

Iz te enačbe izhajajo ostala razmerja oziroma merila veličin:

Razmerje hitrosti:
$$\lambda_v^{We} = \frac{v_m}{v_n} = \frac{We_m \cdot \sqrt{\sigma_m / (\rho_m \cdot L_m)}}{We_n \cdot \sqrt{\sigma_n / (\rho_n \cdot L_n)}} = \sqrt{\frac{\sigma_m}{\sigma_n} \cdot \frac{\rho_n \cdot L_n}{\rho_m \cdot L_m}}$$

$$\lambda_v^{We} = \sqrt{\frac{\lambda_\sigma}{\lambda_L \cdot \lambda_\rho}} \quad (17)$$

Razmerje časa: $\lambda_t^{We} = \frac{\lambda_L}{\lambda_v} = \frac{\lambda_L}{\sqrt{\frac{\lambda_\sigma}{\lambda_L \cdot \lambda_\rho}}} = \sqrt{\frac{\lambda_L^2 \cdot \lambda_L \cdot \lambda_\rho}{\lambda_\sigma}}$

$$\lambda_t^{We} = \sqrt{\frac{\lambda_L^3 \cdot \lambda_\rho}{\lambda_\sigma}} \quad (18)$$

Preglednica 2: Pretvorniki med količinami v naravi in na modelu.

Table 2: Transformations between nature and model quantity.

		Froudov zakon			Reynoldsov zakon
		nepopačeno modelno merilo	popačeno modelno merilo		nepopačeno modelno merilo
količina	enota		x, y*	z**	
geometrijske lastnosti					
dolžina	m	λ_L	$\lambda_{x,y}$	λ_z	λ_L
površina	m^2	λ_L^2	$\lambda_{x,y} \cdot \lambda_z$	$\lambda_{x,y}^2$	λ_L^2
prostornina	m^3	λ_L^3	$\lambda_{x,y}^2 \cdot \lambda_z$		λ_L^3
kinematične lastnosti					
hitrost	$\frac{m}{s}$	$\sqrt{\lambda_L}$	$\sqrt{\lambda_z}$	$\frac{\lambda_z^{3/2}}{\lambda_{x,y}}$	$\frac{\lambda_\mu}{\lambda_L \cdot \lambda_\rho}$
čas	s	$\sqrt{\lambda_L}$	$\frac{\lambda_{x,y}}{\sqrt{\lambda_z}}$		$\frac{\lambda_L^2 \cdot \lambda_\rho}{\lambda_\mu}$
pretok	$\frac{m^3}{s}$	$\lambda_L^{3/2}$	$\lambda_{x,y} \cdot \lambda_z^{3/2}$		$\frac{\lambda_L \cdot \lambda_\mu}{\lambda_\rho}$
pospešek	$\frac{m}{s^2}$	1	$\frac{\lambda_z}{\lambda_{x,y}}$	$\frac{\lambda_z^2}{\lambda_{x,y}^2}$	$\frac{\lambda_\mu^2}{\lambda_L^3 \cdot \lambda_\rho^2}$
dinamične lastnosti					
sila	$\frac{kg \cdot m}{s^2}$	$\lambda_L^3 \cdot \lambda_\rho$	$\lambda_{x,y} \cdot \lambda_z^2 \cdot \lambda_\rho$		$\frac{\lambda_\mu^2}{\lambda_\rho}$
tlak	$\frac{kg}{m \cdot s^2}$	$\lambda_L \cdot \lambda_\rho$	$\lambda_z \cdot \lambda_\rho$		$\frac{\lambda_\mu^2}{\lambda_L^2 \cdot \lambda_\rho}$
gostota	$\frac{kg}{m^3}$	λ_ρ	λ_ρ		λ_ρ
površinska napetost	$\frac{kg}{s^2}$	λ_L^2	$\lambda_z \cdot \lambda_\rho$		$\frac{\lambda_\mu^2}{\lambda_L \cdot \lambda_\rho}$
energija	$\frac{m^2 \cdot kg}{s^2}$	$\lambda_L^4 \cdot \lambda_\rho$	$\lambda_{x,y} \cdot \lambda_z^3 \cdot \lambda_\rho$		$\frac{\lambda_\mu^2 \cdot \lambda_L}{\lambda_\rho}$
moč	$\frac{m^2 \cdot kg}{s^3}$	$\lambda_L^{7/2} \cdot \lambda_\rho$	$\lambda_z^{7/2} \cdot \lambda_\rho$		$\frac{\lambda_\mu^3}{\lambda_L \cdot \lambda_\rho^2}$

* površina: x, y - površine v ravninah z normalo v smeri x in y

** površina: z - površine v ravninah z normalo z

Površinska napetost se pojavlja samo na stični ploskvi tekočin. Vedno teži k zmanjšanju ali uravnoteženju ukrivljenosti površine. Nastopajoče sile so običajno prešibke, da bi vplivale na značaj toka tekočine. Vendar pa je površinska napetost lahko pomembna v primerih, ko so linearne dimenzije toka majhne in pri stiku zraka z gladino. Tak je denimo tok preko ostrorobega preliva z zelo nizko pretočno višino, kjer se zaradi površinske napetosti pojavlja prilepljanje toka na ostenje preliva. Posebno obravnavo njenega vpliva je treba posvetiti pri modelnih študijah zelo nizkih tlačnih višin pri pragovih, vsrkavanju zraka, škropljenja in pršenja. Učinek površinske napetosti je viden tudi v primeru majhnih valov (kapilarni valovi), ki nastanejo na vodni površini ob rahlem vetriču. Sile površinske napetosti so ponavadi zanemarljive pri obravnavi hidravličnih problemov v naravi, saj so tam Webrova števila vedno velika. V laboratorijih pa jih je včasih treba upoštevati, še posebno pri modelih z izrazito majhno globino vode.

Ker sta najbolj običajna Froudova in Reynoldsova modelna podobnost, je prikaz pretvornikov med količinami v naravi in na modelu podan za Froudov in Reynoldsov zakon modelne podobnosti v Preglednica 2 (Chanson, 1999).

Ker imamo lahko v navideznem okolju tudi simulacije dinamike, je treba opozoriti na dejstvo, da je merilo časa na modelih odvisno od merila modela. Čas procesov je zato na modelu lahko različen od časa prototipa.

Posebnosti modelov z gibljivim dnom

Modeli s premičnim dnom se uporabljajo pri simulacijah procesov erozije in odlaganja proda. Za izvedbo dna imamo na razpolago različne materiale. Če je strižna sila, ki se pojavi na ostenju zaradi pretoka, dovolj velika, pridejo v poštev peščena zrna specifične teže, ki se bistveno ne razlikuje od tistih na prototipu. V nasprotnem primeru je treba uporabiti lažji enostavno prenosljiv material, katerega specifična teža je le malo večja od specifične teže vode. V to kategorijo sodijo posebne oblike premoga v prahu, plovec, zdrobljena plastika in trske. Ker je nemogoče povsem natančno posnemati zapleten mehanizem premeščanja plavin, so lahko rezultati le pretežno točni. Dobrodošla je validacija modela. Če se namreč na podlagi

preteklih izkušenj pokaže, da model izkaže spremembe dna v pravilnem časovnem zaporedju, je verjeti, da bo tudi modelna napoved prihodnjih trendov dokaj zanesljiva.

Hidravlični modeli z gibljivim dnem so eden od najzahtevnejših tipov modela in pogosto dajejo nezadovoljive rezultate. Osnovna težava je, kako poiskati merilo za oba pojava, premeščanje plavin in gibanje tekočine. Poleg tega se lahko zgodi, da postane hrapavost struge funkcija geometrije rečnega korita in premeščanja plavin. Zgodnje hidravlične raziskave z gibljivim dnem (River Mersey v Angliji; konec 19. stoletja) so pokazale, da se merilo časa, ki velja za tok tekočine, razlikuje od merila časa, ki velja za gibanje proda (Chanson, 1999).

Modeli vodnih sistemov v navideznem okolju so v trirazsežno okolje umeščeni v dejanskem merilu oziroma modelna podobnost ni potrebna. To pa pomeni, da je potrebno pred umestitvijo rezultatov fizičnega hidravličnega modela vse količine preračunati na dimenzije, veljavne v realnem svetu.

4.7.2.2 Matematični hidravlični modeli

Razvoj računalniške tehnologije je omogočil uporabo vedno kompleksnejših računalniških programov. Trendu uporabe numeričnih metod so sledili tudi razvojni inženirji z izdelavo hidravličnih programov. Tako se je reševanje hidravličnih problemov z nekoč pretežno grafičnega postopka na papirju preselilo na računalniške procesorje, sprva le kot enodimenzionalni modeli, v zadnjih časih pa v vedno večji meri kot dva- in tri- dimenzionalni modeli.

Začetnik numeričnega računa v rečni hidravliki je Francoz J. B. Belanger (1828). Razvil je enačbe za enodimenzionalni model za mirni, postopoma spreminjajoč se tok v odprtem kanalu. Opravil je prve uspešne izračune, pri čemer je za integracijo enačb uporabil diferenčno metodo (Chanson, 1999).

Enodimenzionalni matematični modeli

Protitočni računi, ki se izvajajo v primeru mirnega toka v vodotoku od prereza, kjer je podan spodnji (dolvodni) robni pogoj, so bili izpeljani na osnovi naslednjih predpostavk:

- o tok je enodimenzionalen,
- o tok je neenakomeren,
- o tok je stalen,
- o tok se spreminja postopoma,
- o v danem profilu (s pripadajočim odsekom vodotoka) so energijske izgube enake energijskim izgubam pri stalnem toku pri enaki globini in enakem pretoku.

Za račun gladin pri stalnem neenakomernem toku velja energijska enačba:

$$\frac{\partial E}{\partial s} = -I_0 = \frac{\partial}{\partial s} \left(z + \frac{p}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2 \cdot g} \right) = -D \cdot \frac{1}{2 \cdot R} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (19)$$

kjer so:

- s ... koordinata naravnega koordinatnega sistema tangenta na os struge,
- I_0 ... energijski padec,
- z ... višinska kota,
- p ... tlak,
- v ... povprečna hitrost toka,
- D ... Darcijev koeficient,
- R ... hidravlični radij.

Za mirni tok, pri katerem se vpliv motenj širi tudi gorvodno, je potrebno, da se vedno računa potek gladine od spodnjega prečnega profila proti zgornjemu, pri čemer mora biti kota gladine v zadnjem dolvodnem prečnem profilu že vnaprej znana. Gladine se računa od profila do profila v smeri proti toku (Rajar, 1980). Integracija zgornje enačbe pa poteka dolvodno v smeri toka, kadar se na odseku pojavi deroči režim toka. Poudariti je treba, da je račun v veliki meri odvisen od koeficientov trenja, zato se lahko v praksi pojavlja velika negotovost pri določitvi dejanskih faktorjev izgub zaradi trenja.

V začetku devetdesetih let 20. stoletja so se enodimenzionalni modeli uporabljali za račun poteka gladin pri stalnem enakomernem in neenakomernem toku s prosto gladino v prizmatičnih koritih ali v naravni rečni strugi nepravilne oblike. Večina programov je bila prirejenih za račun poteka gladin v mirnem režimu toka. Če je lokalno nastopil deroči tok, je program prevzel globino, ki je bila za 10% večja od kritične, in s to globino nadaljeval račun. V primerih, kjer je na večini odsekov prevladoval deroči tok, so bili rezultati neuporabni. V strugah, kjer je bil prečni profil deljen na glavno korito in poplavna področja, je postal izračun netočen, ker je bila v programu predpostavljena enakomerna porazdelitev hitrosti po celotnem preseku. Za taka področja so primernejši kompleksnejši dvodimenzionalni programi.

Danes računalniški programi že vključujejo možnost, da se tok na posameznih odsekih spremeni nenadno. S tem omogočajo račun toka tudi skozi prepuste in tok pod mostovi. Program *HEC-RAS*, ki omogoča izvedbo enodimenzionalnega računa stalnega neenakomernega toka, za odseke, kjer se tok spreminja nenadno, izjemoma uporablja enačbo gibalne količine (Mikoš in Mastnak, 1998).

Včasih so bili 1-dimenzionalni modeli toka omejeni tudi s tem, da so v posameznem prerezu izračunali samo povprečno hitrost. V strugah, kjer je bil prečni profil deljen na glavno korito in poplavna področja, je postal izračun netočen, ker je bila v programu predpostavljena enakomerna porazdelitev hitrosti po celotnem preseku (Rajar, 1980). Danes tudi mnogi 1R programi omogočajo delitev prečnega profila na glavno strugo in na poplavni območji pa tudi porazdelitev globinsko povprečenih hitrosti po prerezu. Tok je računan kot vejičasti enodimenzionalen tok, ker so upoštevane samo komponente hitrosti v smeri toka, pa čeprav so razmere računane v posameznih delih prereza.

Za prikaz vodne gladine navideznem okolju je 1R račun le omejeno uporaben, saj ne podaja različnih višin gladine v prečnih prerezih kot je to v primeru 2R računa. Kljub temu pa že 1R račun podaja, v primeru umerjanja matematičnega hidravličnega modela, ustrezne rezultate s katerimi lahko modeliramo gladino v navideznem okolju, saj nam podaja gladino kot ploskev.

Dvodimenzionalni matematični modeli

Dvodimenzionalni modeli omogočajo račun stalnega in nestalnega toka s prosto gladino tako, da račun gladin in razporeditve hitrosti potekajo za vsak končni element znotraj mreže. Pri dvodimenzionalnem toku se zanemari vertikalna komponenta hitrosti in se računa z globinsko povprečenimi vrednostmi horizontalnih komponent hitrosti. Zaradi enakomerne porazdelitve hitrosti po globini je porazdelitev pritiskov po globini hidrostatična.

Uporaba dvodimenzionalnih modelov je smiselna pri strugah, katerih širina je velika glede na njihovo globino. To velja predvsem pri računu visokih voda, pri katerih se voda preliva na okoliška poplavna območja. Prednosti takih računov se pokažejo tudi pri tokovnih razmerah, kjer nastopi hipna razširitev ali zožitev struge, saj se tam pojavijo izrazitejšše komponente hitrosti, pravokotne na smer glavnega toka.

Kontinuitetna enačba za globinsko povprečen dvodimenzionalni tok se glasi:

$$\frac{\partial(v_x \cdot h)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y \cdot h)}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (20)$$

kjer so:

v_x ... komponenta hitrosti v x smeri,

v_y ... komponenta hitrosti v y smeri,

h ... globina vode,

t ... čas.

Dinamični enačbi za koordinatni smeri x in y za globinsko povprečen dvodimenzionalni tok se lahko zapiše v naslednji obliki:

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\partial v_x}{\partial x} \cdot v_x + \frac{\partial v_x}{\partial y} \cdot v_y + g \cdot \frac{\partial h}{\partial x} &= g \cdot (I_{0,x} - I_x) \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \cdot v_x + \frac{\partial v_y}{\partial y} \cdot v_y + g \cdot \frac{\partial h}{\partial y} &= g \cdot (I_{0,y} - I_y) \end{aligned} \quad (21)$$

kjer so:

v_x ... komponenta hitrosti v x smeri,

v_y ... komponenta hitrosti v y smeri,

I_x ... padec dna v x smeri,

I_y ... padec dna v y smeri,

$I_{0,x}$... energijski padec v x smeri,

$I_{0,y}$... energijski padec v y smeri,

t ... čas.

2R modeli že kot osnovni podatek potrebujejo trirazsežno geometrijo reliefa oz. zemeljskega površja. V navideznem okolju lahko iz modela zemeljskega površja izvedemo ekstrakcijo poljubne mreže točk za opis geometrijskih robnih pogojev (Gosar et al. 2006), ki naj bi najbolj ugodno vplivali na rezultate, npr. čas računa, točnost računa, ipd. Izračunana gladina v prečnih prerezihi ni horizontalna in predstavlja na računskem odseku ukrivljeno ploskev, ki natančneje zajema višine oziroma razsežnost vodnega telesa. Hitrosti so v prečnem prerezu različne (po širini prečnega prereza), zato lahko analiziramo tudi vpliv na objekte in stavbe umeščene v navidezno okolje.

Tridimenzionalni matematični modeli

Pri toku s prosto gladino je hidrostatična komponenta vodnega tlaka običajno večja od dinamične komponente vodnega tlaka in povzroča sekundaren tok v prečni smeri. Zaradi tega bi moral biti, za ustrezno približanje realnim razmeram, tok s prosto gladino obravnavan kot prostorski in simuliran s tridimenzionalnim modelom (Lu et al., 2004).

Diferencialna oblika kontinuitetne enačbe za prostorski tok je:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \cdot \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = 0 \quad (22)$$

kjer so:

ρ ... gostota tekočine,

t ... čas,

v_x ... komponenta hitrosti v x smeri,

v_y ... komponenta hitrosti v y smeri,

v_z ... komponenta hitrosti v z smeri.

Dinamično enačbo za globinsko povprečen dvodimenzionalni tok se lahko zapiše v naslednji vektorski obliki:

$$\frac{d\bar{v}}{dt} = \bar{F} - \frac{1}{\rho} \cdot \text{grad}(p) \quad (23)$$

oziroma v obliki, zapisani za kartezični koordinatni sistem:

$$\begin{aligned} \frac{dv_x}{dt} &= F_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \\ \frac{dv_y}{dt} &= F_y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} \\ \frac{dv_z}{dt} &= F_z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned} \quad (24)$$

3-dimenzionalni matematični modeli opisujejo tok vode v vseh treh dimenzijah. Prikaz množice podatkov npr. polja hitrosti ali območja vrtincev so najprimernejša v obliki grafičnega prikaza. Navidezno okolje pa poleg prikaza samostojnega fenomena vode omogoča umestitev opazovanih količin v univerzalno okolje, v katero so vključene tudi druge entitete prostora npr. analiza evakuacijskih poti toka poplavnih voda v naselju, kjer se moramo izogibati, poleg visoke vode, velikim hitrostim toka, ipd.

4.7.2.3 Primerjava fizičnih in matematičnih hidravličnih modelov

Slabost fizičnih modelov je, da so dragi. Treba je namreč zgraditi in oblikovati vse detajle, za preskušanje različnih variant pa je treba model prezidati. Poleg tega je pri gradnji fizičnih modelov potrebno upoštevati kar nekaj omejitev (glede velikosti modela, pretoka, energijske črte), ki so vezane na zmožnosti laboratorija. Zato fizični modeli običajno niso primerni za analize tokovnih situacij na zelo velikih območjih. Npr. pri modelu vodotoka (tok s prosto gladino) v merilu 1 : 100 je učinek sile teže sicer še vedno prevladujoč, a vpliv viskoznosti lahko postane pomemben. Z geometrijskim linearnim merilom modela med 1:50 in 1:25 se lahko uspešno zmanjša ali izloči napake zaradi vpliva viskoznih sil (Chanson, 1999). Prednost fizičnih modelov pa je v tem, da so natančnejši pri preiskavah manjših območij, da so primernejši za raziskovanje lokalnih procesov oziroma procesov, za katere matematični modeli še niso dovolj zanesljivi. Zelo redko so rezultati fizičnih modelov povsem nerealni in neuporabni saj so zelo nazorni; razen pazljivosti pri interpretaciji zakonov modelne podobnosti večjih težav pri določitvi zakonitosti tokovne slike ni.

Matematični modeli so hitrejši in cenejši, saj je z enostavno nadgradnjo možna uporaba modela za mnoge podobne probleme. Običajno so primernejši za simuliranje procesov toka večjega merila, predvsem za simulacije onesnaženja na širšem območju, saj praktično ni omejitev za velikost modela obravnavanega območja. Omejitve matematičnih modelov glede spominske zmogljivosti in hitrosti računanja sicer še vedno obstajajo, a z vse hitrejšim razvojem računalniške tehnologije vedno bolj zgubljajo pomen. Nekoliko večji problem je zanesljiva simulacija toka s prosto gladino v vodotokih, ki zaradi spremenljivosti toka, odsekov turbulentnega režima, nepravilne geometrije prereзов in ukrivljenosti struge še vedno predstavlja edinstven izziv v numeriki. S povečanjem števila računskih iteracij se namreč povečuje numerična difuzija, zato postajajo rezultati vse manj uporabni. Uporaba vsakega, še posebej komercialnega programa, pa je seveda omejena s predpostavkami, na osnovi katerih so bile izpeljane v program vgrajene enačbe.

Poudariti velja, da je toga omejitev na uporabo bodisi samo fizičnega ali samo matematičnega modela lahko nevhvaležna. Vsak ima svoje prednosti in področja uporabe, vzajemno pa se

dopolnjujeta. Ustrezna pot je zato uporaba obeh vrst modelov, vsakega na tistem področju raziskav, kjer je najprimernejši.

Skupna pomembna lastnost fizičnih in matematičnih modelov je, da v okviru modela vodnega sistema zagotavljajo kontinuiteto toka vode. Ali je možno v prihodnosti pričakovati, da se bodo načela fizičnih in matematičnih modelov združila v navideznem okolju in uporabi informacijskih tehnologij? Seveda, saj pri simuliranju dinamike tekočin v zahtevnih strojih in napravah že opazimo takšen razvoj.

4.7.3 Umerjanje

Umerjanje (kalibracija) modela je postopek spreminjanja modelnih parametrov do te mere, da se izmerjene vrednosti (fizičnega modela) oziroma izračunane rešitve (matematičnega modela) ujemajo z nizom v naravi izmerjeni podatkov, v okvirih sprejemljive oziroma dovoljene stopnje natančnosti.

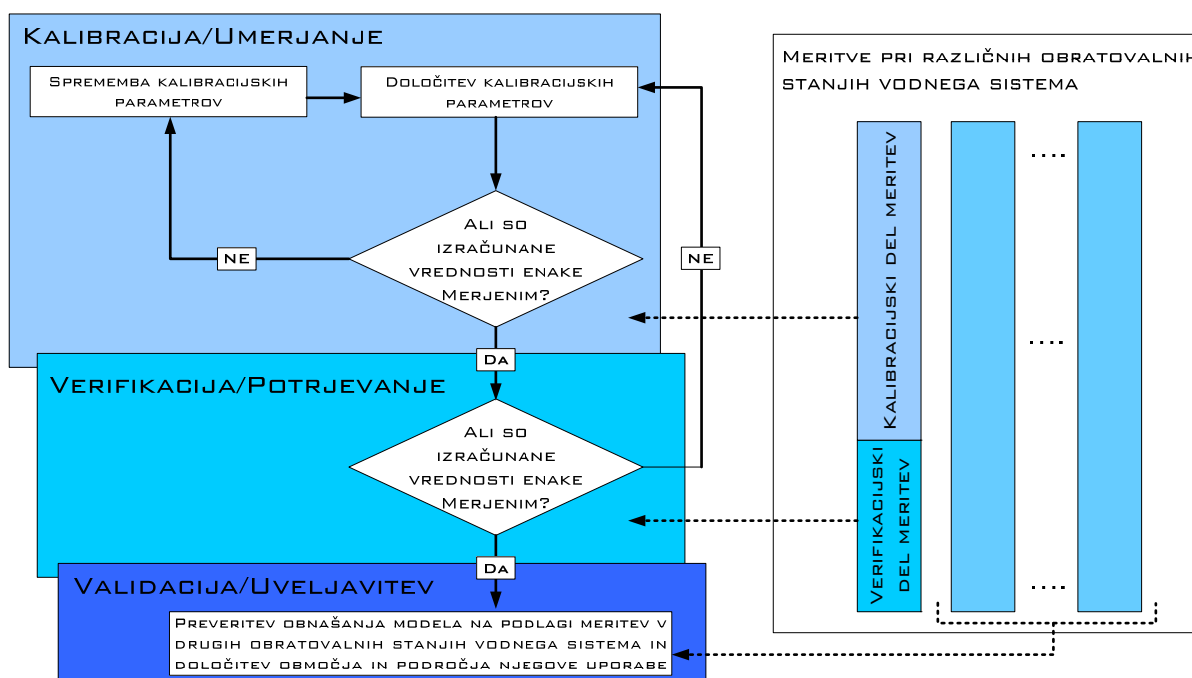
Pri modeliranju vodnih sistemov se pojavljajo mnogi viri napak, ki vplivajo na napovedovanje hidravličnih razmer vodnega sistema. Zato se v procesu hidravličnega modeliranja upošteva določena negotovost v povezavi z napovedmi modela, povezanimi z napakami oziroma zaradi pomanjkljivosti v podatkih.

Ker je hidravlični model predstavitev vodnega sistema, je seveda edino umestno, da vrednosti izračunanih parametrov izkazujejo dejansko dogajanje v vodnem sistemu. V nasprotnem primeru je izdelava hidravličnega modela omejena le na učne postopke oz. na fenomenološko analizo obnašanja vodnih sistemov pri različnih stanjih toka vode.

Umerjanje modela torej predstavlja sistematično prilagajanje lastnosti izdelanega modela tako, da je doseženo čim boljše ujemanje rezultatov modela in razpoložljivega števila izmerjenih vrednosti. Za kalibracijo modela se lahko uporabijo merjene vrednosti vodne gladine, pretoka ali hitrosti. Pri hidravličnih raziskavah v laboratoriju se v fazi umerjanja modela spreminja hrapavost površin modela, pri matematičnih modelih pa se lahko spreminja

različne koeficiente oz. parametre. Ponavadi so ključni tisti, ki se nanašajo na hrapavost struge oziroma izgube zaradi trenja (npr. Manningov koeficient trenja, de Chezijev koeficient, koeficient turbulentne viskoznosti ipd.).

Čeprav se v praksi izraz kalibracija ali umerjanje uporablja za cel postopek izdelave verodostojnega hidravličnega modela, gre za zahteven postopek, ki je praviloma sestavljen iz treh splošno uveljavljenih faz na področjih modeliranja: to so kalibracija, verifikacija in validacija. Enega od pristopov k vzpostavitvi zanesljivega hidravličnega modela, kjer so predstavljeni posplošeni postopki kalibracije, verifikacije in validacije, prikazuje Slika 29 (Šantl, 2007). Na podlagi ustreznih meritev se najprej izvede postopek kalibracije ali umerjanja, to je proces prilagajanja parametrov računskega modela, s čimer se želi izboljšati ujemanje med izračunanimi in merjenimi vrednostmi. V naslednji fazi, to je v postopku verifikacije ali potrjevanja, se na podlagi izbranega neodvisnega, v procesu kalibracije neuporabljenega niza meritev iz enakega obratovalnega stanja preveri in potrdi ustreznost procesa umerjanja. V tej fazi se lahko potrdi, da v določenem obratovalnem stanju model izkazuje želeno ujemanje z vodnim sistemom.



Slika 29: Primer postopka testiranja hidravličnega modela.

Fig. 29: Hydraulic model testing procedure.

Da se preveri in oceni širša uporabnost hidravličnega modela tj. uporaba tudi na drugih sistemih, na katerih model ni bil razvit, je potrebno izvesti postopek potrditve ali validacije modela vodnega sistema. To je postopek, pri katerem se primerjajo rezultati modela in v naravi izmerjeni podatki, s čimer se potrdi zanesljivost modela. Proces validacije se mora izvajati z nizom v naravi izmerjeni podatkov, ki so drugačni od tistih, ki so bili uporabljeni za umerjanje modela.

Preskušanje modela, če se vrednosti, izračunane z računskim modelom, umerjenim na neke druge vrednosti, ujemajo z merjenimi, je potreben, pri zahtevnih objektih pa tudi nujen korak pri razvoju modela. Če model izkaže dobro ujemanje rezultatov z merjenimi vrednostmi, ki niso bile uporabljene pri postopku umerjanja, se lahko njegova uporaba razširi na različne situacije. Smisel validacije je torej oceniti model ter podkrepiti (ali ovreči) verodostojnost modela za uporabo pri analizah izven območja umerjanja. Na žalost pa testiranje modela zaradi nezadostnih podatkov ali časovnih omejitev ni vedno možno. Vseeno pa mora biti v vsakem primeru, tudi kadar je na voljo omejena količina podatkov, model preizkušen, da se preveri smiselnost rezultatov.

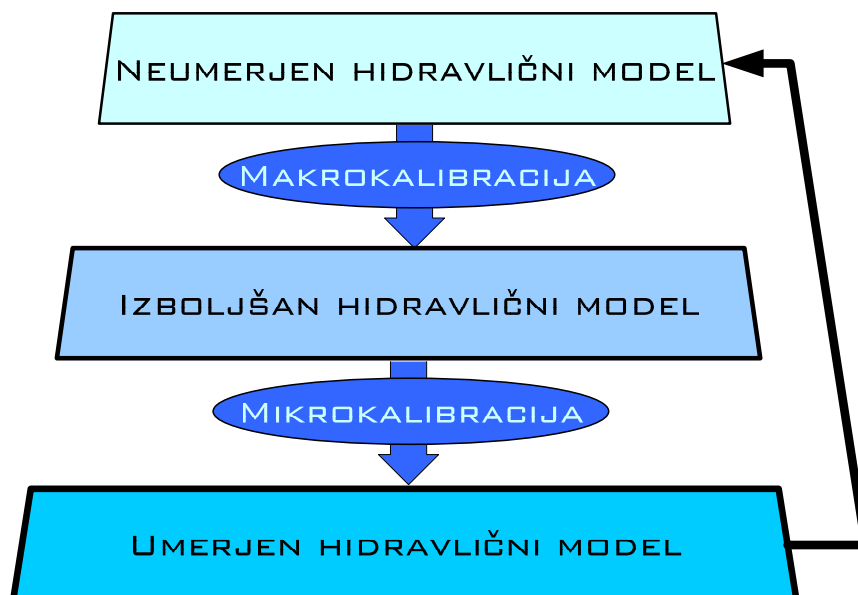
V primeru umerjanja hidravličnih modelov vodnih sistemov, katerih strukture in pogojev obratovanja še ne poznamo dovolj, lahko delo opravimo kot dvostopenjski proces (Walski et al., 2001):

1. makrokalibracija ali grobo umerjanje in
2. mikrokalibracija ali fino umerjanje.

V postopku makrokalibracije se postopoma zagotovi, da neumerjen hidravlični model prek grobega umerjanja, v katerem se odpravljajo grobe napake, preide v izboljššan hidravlični model, po drugi fazi umerjanja ko se precizno umerja sistem, pa v umerjen hidravlični model (Slika 30, Šantl, 2007).

Šele po ustrezno izvedeni makrokalibraciji, v postopku katere naj bi se odpravilo večino razhajanj pri geometrijskih podatkih med dejanskim vodnim sistemom in hidravličnim modelom pa tudi razjasnila pravila obratovanja in načini upravljanja, se lahko preide v fazo

mikrokalibracije, kjer se v ustreznem postopku umerijo zlasti hidravlične spremenljivke, kot je npr. koeficient hrapavosti cevi, natančneje porazdeli poraba po vozliščih modela sistema, ipd.



Slika 30: Proces dvostopenjskega umerjanja.

Fig. 30: Two level calibration procedure.

Proces umerjanja je potreben, saj z verodostojnimi vhodnimi podatki bolje zagotavljamo ustrezno prikazovanje v navideznem okolju. Tudi obratno, ustrezno natančni podatki za umerjanje, umeščeni v navidezno okolje, nam ustreznejše prikazujejo posebnosti merjenih točk, npr. merjena gladina visokih voda ob bregu je zaradi hitrosti vode v stiku z zemeljskim površjem nič, kar pomeni, da je gladina vode v tej točki enaka energijski višini. Preglednost nad merilnimi mesti za umerjanje je v navideznem okolju prikazana ustreznejše, saj pregledujemo podatke v trirazsežnem prostoru.

4.7.4 Viri napak v hidravličnem modeliranju

Z razvojem hidrodinamičnih modelov je bilo rešenih veliko problemov in težav, vendar pa se hkrati pojavljajo tudi novi izzivi. Predvsem je danes težnja razviti čim večjo zanesljivost

modelov in eliminirati glavne vzroke, iz katerih izhajajo napake modelov. Glavni vzroki za nenatančnost modela so lahko:

- sistematične napake pri pridobivanju in zapisu podatkov; npr. nivoji vodne gladine,
- sistematične napake pri vhodnih podatki; npr. padavine, topografski podatki,
- napake, pri določitvi vrednosti parametrov; npr. n_g ,
- napake, zaradi nepopolne strukture modela in posplošitev ter predpostavk.

Napake se pojavljajo pri določanju vrednosti meritev in pri samih simulacijah ter so lahko tako pozitivne kot negativne. Pri uporabi nepovezanih modelov se karakteristike sistema prevzamejo kot homogene znotraj domene posameznih elementov (Alemseged, 2005). Omejitve merilnih tehnik in opreme onemogočajo zagotovitev optimalnih podatkov in vrednosti parametrov, kar ima za posledico rezultate, ki se lahko razlikujejo od pričakovanih. Kaj je za nas še sprejemljivo odstopanje, določimo sami glede na zahtevnost primera (objekta). Predvsem je težava določiti natančne vrednosti koeficientov hrapavosti, attribute topografije obravnavanega območja itd.

Marsikatero napako bi lahko zmanjšali z ustreznimi vhodnimi podatki, vendar pa bi to povzročilo bistveno zvišanje stroškov analiz. Stroški pa ravno tako lahko predstavljajo omejitveni faktor. Reševanja problemov, ki jih povzročajo napake, se lahko lotimo tudi z druge strani in sicer tako, da napake najprej prepoznamo, spoznamo njihov izvor ter pravilno ovrednotimo njihov vpliv na rezultat. Ker posameznih napak ne moremo enostavno sešteti, moramo hkrati posvetiti pozornost tudi temu, kako napake (tolerance) posameznih parametrov vplivajo na ostale in kako na celoten model.

Velik del napak bi lahko zmanjšali s podatkovnimi skladišči modelov vodnih sistemov, kjer bi se vhodni podatki in rezultati shranjevali in ob potrebi dopolnjevali z novejšimi metodami. V navidezno okolje umeščeni vodni sistemi lahko kot informacijsko orodje pomembno pripomorejo k vzpostavitvi podatkovnih skladišč modelov vodnih sistemov.

5 METODOLOŠKA IZHODIŠČA ZA MODELIRANJE VODNIH SISTEMOV V NAVIDEZNEM OKOLJU

Poglavje prikazuje pregled pristopov v podatkovnem modeliranju in računalniški grafiki z namenom, seznaniti se s temeljnimi koncepti in principi, uporabljenimi v doktorski disertaciji, ki so sicer uveljavljeni med strokovnjaki za področje geografskih informacijskih sistemov in računalniške grafike, ne pa tudi med strokovnjaki s področja voda.

5.1 Upodobitev objektov v trirazsežnem prostoru

Upodobitev objektov v trirazsežnem prostoru je uveljavljena v nekaterih grafičnih programskih paketih, z novejšimi tehnikami pa se uveljavlja tudi na področju geografskih informacijskih sistemov (GIS). V bazah podatkov GIS so obravnavani predvsem objekti kot prostorsko opredeljeni elementi z notranjo vsebino. Pretežno so predstavljena geometrično enostavna telesa, kot npr. kocke ali kvader. Modeliranje tovrstnih elementov je zapleteno, zato je podvrženo mnogim kompromisom in poenostavitvam.

Za ustrezno ponazoritev trdnih teles je treba upoštevati naslednja načela (Shene, 2003):

- področje modela: nobena modelna predstavitev ne more podati vseh značilnosti trdnega telesa, vendar pa naj bo uporabljena poenostavljena rešitev ali abstrakcija, ki je zmožna kakovostno, vsebinsko predstaviti izbrane geometrične lastnosti obravnavanih prostorskih trirazsežnih objektov;
- nedvoumnost: ob prikazu trdnega telesa naj bo nedvomno kaj le-ta prikazuje, ob tem pa naj se vsaka nedvoumna ponazoritev prostorskega objekta pojmuje kot celovita;
- edinstvenost: obstaja samo en način kako je določeno trdno telo predstavljeno, saj je le tedaj, če je upodobitev edinstvena, možno primerjati, ali sta dve telesi enaki;
- točnost: trdno telo je točno prikazano, če niso potrebni dodatni podatki;
- veljavnost: prikaz ne sme proizvesti napačnih ali nemogočih teles oziroma, predstavitev mora odgovarjati izbranemu pogledu na trdo telo;

- zaključenost: trdna telesa se lahko preoblikujejo in uporabljajo z različnimi operacijami, kot so unija in presek; zaprtost plašča zato pomeni, da katerakoli operacija ali transformacija trdnega telesa vedno rezultira novo telo;
- kompaktnost in učinkovitost: dobra ponazoritev trdnega telesa naj bo dovolj kompaktna, da se prihrani pomnilniški prostor; na voljo morajo biti učinkoviti algoritmi za proučevanje izbranih lastnosti stvarnih ali modelnih objektov.

5.2 Tehnologija prikazovanja objektov trirazsežnega prostora

Pri uporabi, obdelavi, analizi in prikazovanju elementov v prostoru je zelo pomembna njihova točna lokacija v prostoru. Za prikaz geometrije se najpogosteje uporabljajo naslednji pristopi (Šumrada, 2005b):

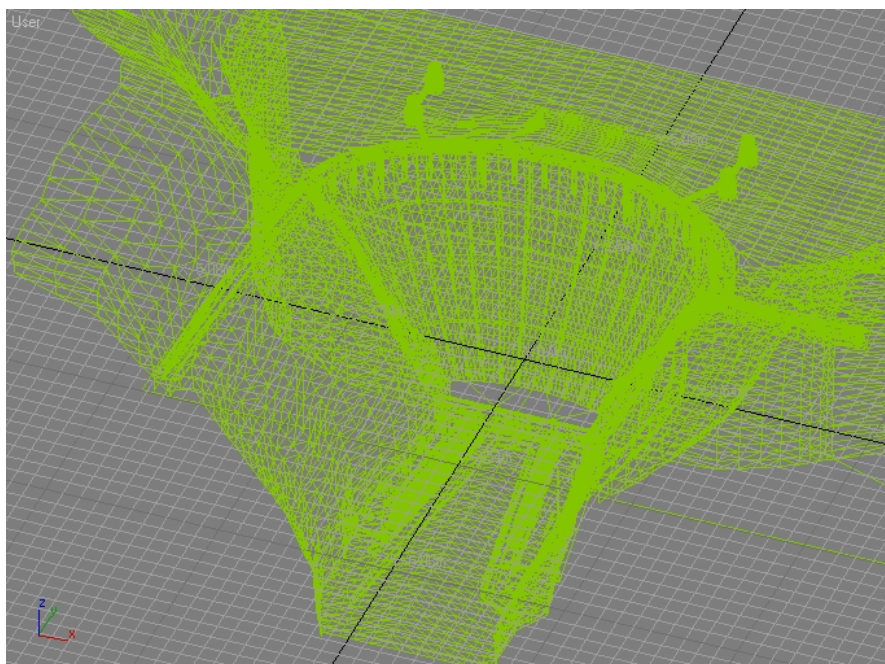
- skeletni ali žično-okvirni pristop (wireframe),
- akumulativno modeliranje (Boundary Representation – B-Rep) in
- proizvodno modeliranje (Constructive Solid Geometry – CSG).

5.2.1 Žično-okvirni pristop

Skeletni model ali žično-okvirni model (wireframe) je najverjetneje najstarejši pristop za modeliranje trdnih teles. Skeletna ponazoritev prostorskih objektov izrecno ne podaja značilnosti robnih ploskev, ki so lahko podane zgolj kot robni poligon razvrščenih segmentov. Robovi prostorskega objekta na splošno niso izključno linijski segmenti, temveč so lahko tudi krivočrti. V takšnih primerih so za njihovo ponazoritev potrebne dodatne, detajlne točke. Čeprav skeletni pristop temelji na enostavni geometrični in topološki podatkovni sestavi, je lahko takšna žična ponazoritev prostorskih objektov tudi dvoumna (Shene, 2003).

Ker so lahko skeletne ponazoritve prostorskih objektov lahko dvoumne, je dejanska uporaba precej omejena. Vendar so žični modeli pogosto uporabljani, saj so enostavni za izdelavo in omogočajo učinkovito izvedbo. Ker se prikazujejo samo oglišča in robovi teles, problemi

vidnosti oz. prekrivanja niso vključeni (Slika 31, vir modela: Dosh 3D). Metoda se uporablja za pregleden ali pa hiter delovni prikaz prostorskih objektov, kjer realistično upodabljanje zavzame mnogo računalniškega časa. Skeletnemu modelu se lahko dodajo nanosi na robne ploskve, ki povečajo verodostojnost upodobitve prostorskega objekta.



Slika 31: Primer skeletnega modela pregrade.

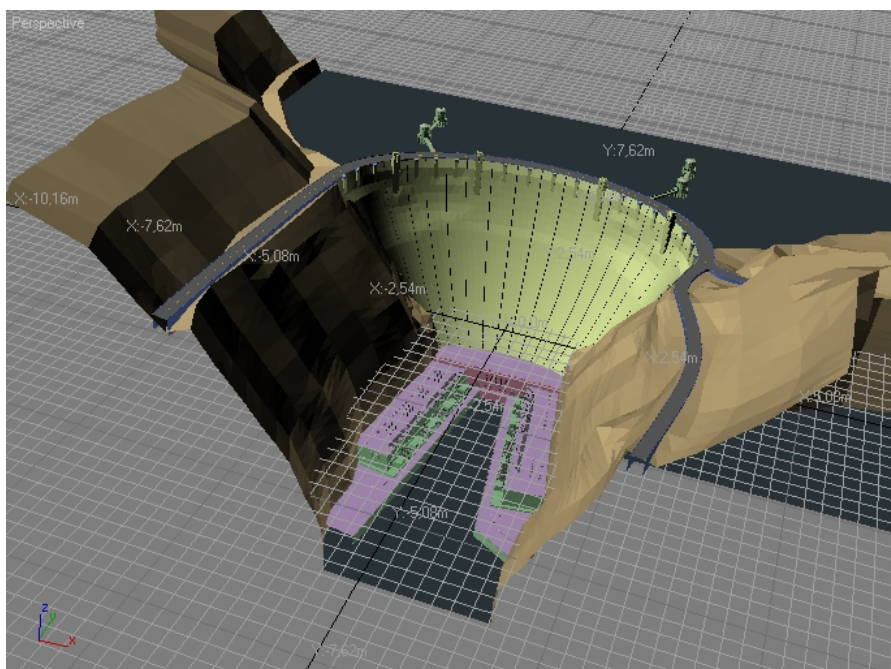
Fig. 31: Wireframe model of dam.

5.2.2 Akumulativno modeliranje

Akumulativno modeliranje (Boundary Representation – B-Rep) je nadgradnja skeletnega pristopa. Temelji na opredelitvi trdnega telesa s stikajočimi se robnimi ploskvami prostorskega objekta. Prednost akumulativnega modeliranja pred žičnim modeliranjem je opredeljevanje telesa s pomočjo vseh robnih površin, kar pomeni, da ima takšen objekt sklenjen zgled zunanosti in zaprto notranjost. Obodne površine trdega telesa so določene z dosledno določenimi ploskvami, ki so geometrično opredeljene in tvorijo njegovo ovojnico. Robne ploskve se stikajo v robovih, ti pa v ogliščih. Robovi so topološki segmenti, ki z razvrstitvijo v zanko določajo obodni poligon za vsako ploskev telesa. Segmenti so lahko linije ali krivulje. Krivi segmenti so topološko enakovredni premim povezavam med vozlišči,

geometrični zgled in dejanska izvedba pa sta zahtevnejša. Akumulativni model je torej razširitev skeletnega pristopa s tem, da so dodani tudi podrobni podatki o lastnostih vseh robnih površin. Topološki zapis obsega, poleg usmerjenosti in povezljivosti, tudi podatke o zaporednosti segmentov v obodnih poligonih ali robovih ploskev ter nadalje zaporednost robnih ploskev, ki tvorijo celoten ovoj prostorskega objekta. (Šumrada, 2005b)

Pri akumulativnem modeliranju so pomembni geometrični in ključni topološki podatki (Slika 32, vir modela: Dosh 3D). Slednji podajajo topološke odnose med vozlišči (oglišči), segmenti (robovi) in obodi ploskev (poligoni). Ker se kot lupina objekta uporabljajo robne ploskve, ki so geometrično izrecno opredeljene, se lahko nanje polagajo razni prekrivalni nanosi (draparije) za ustrezno poudarjanje detajlov. Akumulativni pristop je zlasti primeren za ponazoritev trirazsežnih objektov, katerih točke so merjene, ker je možno obravnavati tudi zapletene poliedre kot celovito geometrično telo.



Slika 32: Primer akumulativnega modela pregrade.

Fig. 32: Boundary representation model of dam.

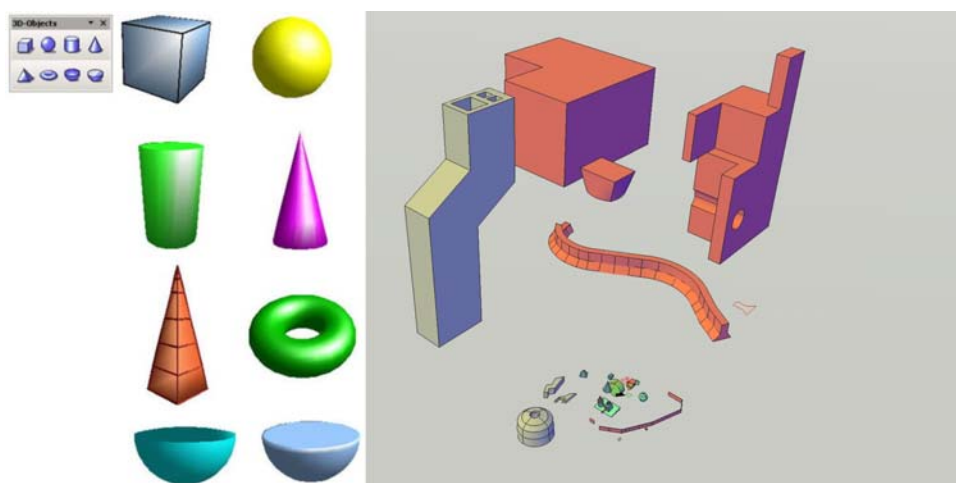
Pri akumulativnem modeliranju je za vsak prostorski objekt izjemno pomembna orientacija vsake njegove ploskve za sestavo oboda trdnega telesa, saj mora vektor normale v vsaki točki

dela ploskve, ki tvori zunanji ovoj telesa, kazati v zunanost, iz telesa. Na tak način je možno opredeljevati notranjo in zunanjo stran telesa.

5.2.3 Proizvodno modeliranje

Geometrija prostorskega objekta pri proizvodnem modeliranju (Constructive Solid Geometry – CSG) je sestavljena iz parametrično opredeljenih trirazsežnih gradnikov, ki se volumsko kombinirajo s pomočjo raznih operatorjev iz teorije množic, tj. unija, presek in razlika. Izvedba proizvodnega modeliranja se lahko opiše kot niz enačb in se zato lahko tudi pojmuje kot posebna izvedbena metodologija. Tovrsten pristop je zlasti primeren za modeliranje in konstruiranje trirazsežnih objektov s CAD orodji. GIS orodja so pretežno podprta z metodami akumulativnega modeliranja, zato je izmenjava modelov med orodji CAD in GIS otežena.

Standardni CSG gradniki predstavljajo geometrična telesa, kot so kvader, razne trikotniške piramide, krogla, valj, stožec, svitek ipd. (Slika 33). Ti osnovni CSG gradniki so podani v normalni ali ustrezno izpeljani obliki kot objektni tipi, ki jih mora uporabnik uporabiti pri modeliranju telesa kot sestavne objekte. Pri uporabi takšnih izpeljanih elementov v prostoru so lahko potrebne določene pretvorbe ali ustrezne transformacije, kot so na primer translacija, rotacija in sprememba merila.



Slika 33: Osnovni CSG gradniki (levo) in primer proizvodnega modeliranja (desno).

Fig. 33: CSG primitives (left) and sample of CSG modelling (right).

Proizvodno modeliranje je široko uporabljeno v CAD sistemih zaradi številnih prednosti:

- modeliranje z osnovnimi gradniki in operatorji je mnogo bolj razpoznavno kot prikazovanje ploskev v akumulativnem modeliranju (razen v primerih, ko nabor gradnikov ne omogoča predstavljanja ustrezne oblike objekta),
- izdelani modeli omogočajo ponovno uporabo in oblikovanje knjižnic objektov,
- lahko so povezani med seboj z dodatnimi informacijami in
- proizvodno modeliranje vsebuje drevesno strukturo vzpostavljenega objekta, ki je lahko uporabljena za različne namene.

Konstrukcijo modelov zgradb v trirazsežnem prostoru lahko gledamo kot na algoritem v obliki drevesa, saj lahko obravnavani prostor predstavimo z drevesom vozlišč, ki predstavljajo različne osnovne domnevne oblike objektov. Iskalno drevo postopno ustvarjamo z iskalno metodo. Na koncu je element v trirazsežnem prostoru opisan kot CSG drevo, kjer liste predstavljajo posamezni osnovni delci in vozlišča med njimi.

5.3 Osnovne sestavine topologije trirazsežnega modela

Topologija podaja povezljivost in opisuje logične sosedske odnose med lokacijami posameznih pojavov v prostoru. Topologija predstavlja in definira geometrično povezanost in razvrstitev (vrstni red) grafičnih gradnikov, ki tvorijo nek prostorski objekt, brez uporabe njihove absolutne lokacije oziroma koordinat. V vektorski sestavi grafičnih podatkov topologija predstavlja temelj geometrijske organizacije podatkov (Šumrada, 2005a).

Trirazsežni topološki model prostora tvorijo:

- a) osnovni prostorski objektni tipi, ki so: vozlišče, segment, rob, ploskev in telo ter,
- b) izpeljana sestavljena objektna tipa: obodni poligon in lupina.

Skupaj lahko služijo za določitev splošne prostorske topologije geometrično opredeljivih teles (Šumrada, 2005b).

Vozlišče je ničrazsežni prostorski objektni tip, ki je topološko stičišče. Izveden je iz s koordinatami podane točke, ki določa položaj vozlišča v ravnini ali prostoru. Razen s pomočjo točkovnih koordinat opredeljene lege, ima vsako vozlišče tudi enolični identifikator in dodatne opisne lastnosti.

Segment je usmerjena topološka povezava med dvema vozliščema. Razen obeh vozlišč, ki opredeljujeta segment z zapisom od-do in podano usmeritvijo, ima vsak segment tudi lasten identifikator. Dodajo se mu lahko podatki o območju na levi in desni strani. Glede na geometrično obliko je segment lahko prema ali krivolinijska povezava v ravnini ali v prostoru. Za opredelitev poteka zahtevanega segmenta so potrebne dodatne detajlne točke.

Rob je sestavljen iz niza razvrščenih enostavnih ali sestavljenih segmentov. Vsak rob ima lasten identifikator in je glede na segmente, ki ga tvorijo, lahko ravninska ali prostorska veriga. Pri trirazsežni upodobitvi prostora podajajo robovi tudi stične ploskve prostorskih teles.

Obodni poligon je posebna oblika sklenjenega roba, ki je opredeljen kot zaključen, iz ravninskih ali prostorskih segmentov sestavljen poligon. Obodni poligon je tako podan kot zaključna zanka, ki jo tvorijo razvrščeni premi ali krivi robovi. Vsak obodni poligon ima lasten identifikator in omejuje eno samo ploskev, ki pa ima lahko več obodnih poligonov.

Ploskev je dvorazsežni prostorski objekt, ki ima lasten identifikator, podano usmeritev (normalni vektor) in dodatne opisne lastnosti. Ploskev določa zaprto območje v ravnini ali pa je del lupine telesa v prostoru. Geometrija ploskve je podana z enim ali več robovi, ki jo omejujejo. Pri določitvi poteka mejne ploskve trirazsežnega objekta lahko pomaga vsako dodatno vozlišče znotraj ploskve. Kakor je oblika roba ploskve podana z vozliščema in dodatnimi detajlnimi točkami, lahko ploskev vsebuje dodatne prostorsko podane detajlne ploskve. Te pomagajo pri opredelitvi poteka in izgleda prostorske ploskve.

Lupino tvori skupina ene, dveh ali več ploskev, ki omejujejo telo. Zaporedje ploskev lupine v splošnem ni določeno, je pa podana njihova usmeritev v smislu njihovega zunanjega in notranjega lica. Takšna opredelitev se poda s pomočjo razvrstitve usmerjenih normal na

ploskvah lupine, ki morajo biti usmerjene v zunanost od telesa. Za veliko geometrično enostavnih teles je možno določiti zaporedje robnih ploskev tako, da si njihova območja, ki tvorijo lupino telesa, sledijo v takšnem vrstnem redu, kot si sledijo njihovi skupni robovi. Vsaka lupina je združena z nekim telesom, saj plašč obsega volumen telesa. Ploskev, ki sestavlja mejo med dvema stikajočima se telesoma, se pojavi samo v dveh lupinah, ki pripadata vsaka enemu telesu. Lupina lahko leži tudi v notranjosti telesa, če npr. podaja praznino v telesu. To praznino pa lahko zapolnjuje tudi drugo telo ali več teles.

Telo je trirazsežni geometrični objektni tip, ki ima lasten identifikator in dodatne opisne lastnosti. Sestavlja ga zaprto območje, ki je del obravnavanega prostora in ima opredeljivo prostornino. Telesa so topološko podana z vozlišči, robovi in ploskvami. Telo omejuje razvrščena in usmerjena skupina ploskev, ki tvori njegovo lupino. Telo ne more sekati ali prekrivati samega sebe ali ostalih teles. Telo lahko vsebuje luknje in vdolbine, ki so določene z notranjo mejo ali zanko, ki jo sestavljajo robovi skupine ploskev okoli takšne luknje ali vdrtnine.

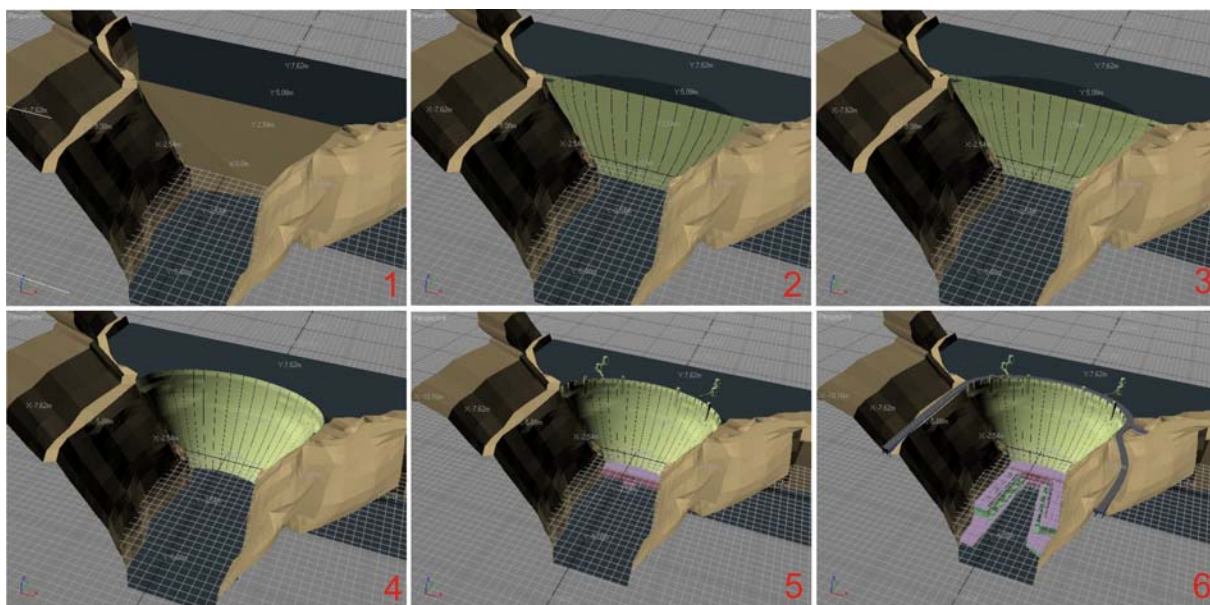
Prostor napolnjuje množica posamezno določljivih teles, ki pa se lahko stikajo ali pa se povezujejo v sestavljena telesa. Telesa se stikajo s ploskvami ali izjemoma z robovi. Vsako telo ima eno zunanjo lupino in nobene ali več notranjih lupin. Vsako lupino tvori množica usmerjenih ploskev, tako da je določljiva njihova zunanja in notranja stran. Po geometrijskem izgledu in zahtevnosti topologije trirazsežnega prostora ločimo konveksna in konkavna telesa. Konveksna ali izbočena geometrijsko opredeljena telesa so enostavnejša, ker so brez lukenj ali vdrtin. Zanje velja pravilo, da katera koli povezava med poljubnima točkama v takšnem telesu ali na lupini leži v celoti v ali vsaj na lupini telesa. Konkavna ali vbočena geometrijsko opredeljena telesa imajo lahko luknje in vdolbine ter so v splošnem topološko zapletene in zahtevne geometrijske sestave.

5.4 Generalizacija trirazsežnih objektov

Stopnja posploševanja/generalizacije detajlov realnega sveta je neposredno povezljiva z nivojem razpoznavnosti trirazsežnih objektov. Število nivojev posploševanja trirazsežnih objektov pa ni določljivo, saj so detajli lahko neskončno zapleteni.

Tematiko bomo prikazali za ločno pregrado, ki zajezi ozko skalno dolino. Lahko jo opišemo v trirazsežnem prostoru kot:

1. ravno ploskev (Slika 34.1, vir osnovnega modela: Dosh 3D),
2. ukrivljeno ploskev (Slika 34.2),
3. ravno lupino (Slika 34.3),
4. lupino, ki povsem ponazarja geometrijo ločne pregrade (Slika 34.4),
5. telo z vsemi bistvenimi elementi pregrade npr. vtokom, iztokom, dovodnim rovom, ipd. (Slika 34.5),
6. telo z vsemi bistvenimi elementi ločne pregrade in napravami ter ureditvami, npr. cesta na kroni pregrade, strojnica, stikališče, ipd. (Slika 34.6).



Slika 34: Nivoji generalizacije na primeru ločne pregrade.

Fig. 34: Level of generalization in the case of arch dam.

Na primeru pregrade sem pokazal, da se lahko, kadar je cilj zgolj upodobitev pregrade, izdelajo različne podobe, ki bi jih npr. zaznali z različnih oddaljenosti. Ker se za opisane nivoje upodobitve podatki zajemajo na različne načine, ima lahko isti objekt več predstavitev glede razpoznavnosti detajlov, ki pa so istočasno tudi veljavni modeli (Šumrada, 2005b).

5.5 Modeliranje vodnih sistemov v navideznem okolju

Kako elemente vodnih sistemov določimo s klasifikacijo in abstrakcijo vodnih pojavov ter vodnih zgradb, naprav in ureditev, je bilo že prikazano. Kadar pa z abstrakcijo in klasifikacijo želimo sestaviti model vodnega sistema, ki bo pravilen, natančen in sodobna ponazoritev realnosti, pa se moramo zavedati, da je model vedno le skrbna posplošitev ter poenostavitev zaznane in interpretirane stvarnosti. Namen prostorskega modela je opis preteklosti, sedanjosti in prihodnosti obstoječega (obravnavanega) dela prostora oziroma izbranega ter poenostavljenega modela realnega sveta. Prostorski podatki so dejstva, ki opisujejo določen pojav v prostoru. Prostorski podatek vsebuje prostorsko referenco, s pomočjo katere je mogoče pojav locirati v matematičnem modelu prostora, ter izbrani opis dodatnih lastnosti pojava ali objekta. Takšen podatek je lahko sestavljen iz več elementov, ki ponazarjajo tri osnovne vidike prostora (Šumrada, 2005a):

- prostorske informacije, ki povedo, kje se objekt nahaja v prostoru,
- opisne informacije, ki povedo, kaj in kakšen je objekt,
- ter časovne lastnosti, ki povedo, kdaj in kako dolgo objekt obstaja.

Vodni sistemi, predvsem vodne zgradbe in naprave, so sestavljeni iz manjših sestavnih delov, ki morajo biti v trirazsežnem prostoru topološko urejeni, hkrati pa to zahteva dodatne vzpostavljene relacije med posameznimi deli objektov in naprav. Vprašanje je, ali je dovolj vzpostavljanje relacij med prostorskimi elementi, ali je za ustrezno obravnavo pomembno tudi vzpostavljanje opisnih relacij in časovnih informacij. Vodni pojavi zaradi neločljive povezanosti s časom zahtevajo tudi stalen in neločljiv časovni podatek, ki se lahko včasih tudi opusti, če je podatek o verjetnosti nastopa pojava, npr. gladina s 100 letno povratno dobo. V trirazsežnem prostoru so prostorske relacije veliko pomembnejše kot v dvorazsežnem prostoru, saj topološko in vsebinsko urejajo celoten model vodnega sistema.

Model vodnega sistema se odraža v pojmovnem smislu kot izbor pomembne vsebine, povezav in odnosov med elementi vodnega sistema. Iz tega sledi pojmovno ali konceptualno modeliranje, ki opredeljuje tipe (razrede) prostorskih pojavov in objektov, njihove lastnosti

(atribute), postopkovno vedenje (obnašanje oz. funkcionalnost) in odnose (relacije) med njimi. Rezultat procesa je izbran in opredeljen podatkovni model. Pojemovno modeliranje vodnih sistemov temelji na zaznavi realnosti, poenostavitvi in abstrakciji funkcionalne sheme vodnega sistema, ustreznih miselnih pravilih in formalnih tehnikah za opredelitev postopkovne sestave izbranega območja.

Prostorski objektni tipi vodnih sistemov so lahko določeni le s klasifikacijo in abstrakcijo vodnih pojavov ter vodnih zgradb, naprav in ureditev. Način oziroma vrsta uporabe elementov vodnih sistemov določa načela in pravila izbire ter opredelitve objektov, njihovo abstrakcijo, vsebino in sestavo. Vrsta uporabe tudi pogojuje izbor in število atributov posameznih objektnih tipov in opredeljuje statične in dinamične odnose med njimi. Takšen način modeliranja se imenuje konceptualno modeliranje.

Prvi korak konceptualnega modeliranja vodnih sistemov je razvrščanje elementov vodnih pojavov v ustrezne objektne tipe (razrede). Objektnim tipom nadalje določamo lastnosti (atribute), ki opisno ali klasifikacijsko opredeljujejo vsebinski pomen posameznega objektnega tipa. Najpomembnejši opis lastnosti modelov vodnih sistemov v trirazsežnem prostoru podaja geometrija in topološki odnosi ter pomenski, semantični atributi. Med objektnimi tipi obstajajo povezave in odnosi tako glede prostora kot tudi lastnosti. Povezave in odnosi združujejo vodne pojave ter vodne zgradbe, naprave in ureditve v model vodnega sistema. Procesno delovanje modela in vmesnikov objektnih tipov pa je definirano z nizom funkcij modela.

Novejši pristop k modeliranju je objektna usmerjenost modeliranja. Objektni model temelji na izomorfni ali enakolični projekciji zaznave, interpretacije in ponazoritvi izbranega dela realnosti. Objekti so pri tem smatrani kot naravna kombinacija podatkov in postopkovnega vedenja (Šumrada, 2005a).

5.6 Ponazoritev vodnih sistemov v navideznem okolju

5.6.1 Trirazsežnost vodnih sistemov

Modeli vodnih sistemov v navideznem okolju izhajajo iz realnega sveta, ki je trirazsežen. Vodni pojavi ter vodni objekti, naprave in ureditve so elementi realnega sveta, ki so locirani v prostoru. Vsi elementi vodnih sistemov pa se ne nahajajo samo na površini, ampak je za celovito ponazarjanje vodnih sistemov potrebno mnogokrat upoštevati celoten vodni krog, torej površinske vode, podzemne vode in atmosfersko vodo. Model vodnih sistemov se v trirazsežnem prostoru lahko gradi podobno kot že uveljavljeni podatkovni modeli, tj. na podlagi izdelanega objektnega kataloga. Vendar pa za ustrezno uveljavljanje modelov vodnih sistemov ni mogoče natančno predpisati prostorskih atributov, saj so geometrične lastnosti posameznih elementov modelov vodnih sistemov neposredna preslikava elementov modelov vodnih sistemov. Tak primer je npr. vodni izvir, ki je v podatkovnih modelih GIS prikazan kot točkovni element, v trirazsežnem prostoru pa je prostorsko telo (Slika 35). Le-to je zaradi razpoklin v kamenini povezano z telesom podzemne vode in ob stiku s površjem povezano s telesom površinske vode.



Slika 35: Fotografija izvira v Vevčanih, Makedonija – povezava podzemne vode in površinske vode.

Fig. 35: Photo of spring in Vevčani, Macedonia – connection of underground and surface water.

5.6.2 Časovna spremenljivost in povezanost vodnih sistemov

Časovno spremenljivost in povezanost vodnih sistemov ponazarja vodni krog (Slika 36, vir: US Geological Survey). Vodni krog v splošnem opišemo s petimi procesi: kondenzacija, padavine, infiltracija, odtok in evapotranspiracija. Ti procesi se dogajajo simultano in, razen padavin, kontinuirano (Kobold, 2007). Kroženje vode v naravi temelji na vodni bilanci vseh njenih pojavnih oblik. Vodni sistemi so del vodnega kroga, kontinuiteta procesov vodnega kroga pa povzroča kontinuiteto toka voda. Kadar naravnih danosti ni dovolj, človek za svoje potrebe ustvarja sebi prilagojene vodne sisteme. Za človeka in njegovo življenjsko okolje je pomembno, da so vse oblike vode v naravi obvladljive, sicer postaja voda izvor različnih tveganj za človeka in naravne ekosisteme, ki prav zaradi časovne spremenljivosti vodnih procesov, ter v povezavi s kontinuiteto procesov vodnega kroga, vplivajo medsebojno in povzročajo vplive tudi na druge sisteme. Zaradi pomanjkljive merilne opreme se danes še vedno srečujemo z vrsto neznank pri določanju količin vode in pretoka vode v posameznih delih vodnega kroga (Brilly in Šraj, 2005).



Slika 36: Vodni krog.

Fig. 36: Water cycle.

Vodni pojavi ter s tem tudi vodne zgradbe, naprave in ureditve imajo zaradi neposrednega stika z vodo kot medijem časovno povezanost, odvisnost ter tudi sistemsko soodvisnost. Na primer vodnemu izviru se izdatnost s časom spreminja, kar se odraža s spremenljivim pretokom v površinskem vodnem telesu in posledično višini gladine. Spremembe v količini vode enega elementa vodnega telesa se lahko odrazijo v celotnem vodnem sistemu, kar povzroča, da je časovna komponenta v obravnavi vodnih sistemov pomembna količina.

5.6.3 Prostorska povezanost elementov vodnih sistemov

Osnovni pristopi v gospodarjenju z vodami poudarjajo pomen celovitosti ukrepov na porečju ali manjših delih – povodjih. Vodni sistemi in posledično modeli vodnih sistemov so prostorsko povezani, saj so vodni sistemi del vodnega kroga (glej tudi Slika 36). Obravnavanje vodnih sistemov v trirazsežnem prostoru vodi neposredno k prostorski povezanosti oz. sistemski soodvisnosti elementov modelov vodnih sistemov, saj lahko v trirazsežnem prostoru lažje povezujemo elemente vodnih sistemov, ki se v sistem povezujejo zaradi masnega pretoka vode pa tudi masnega toka snovi, ki jim je voda transportni medij.

5.6.4 Lastnosti elementov vodnega sistema v trirazsežnem prostoru

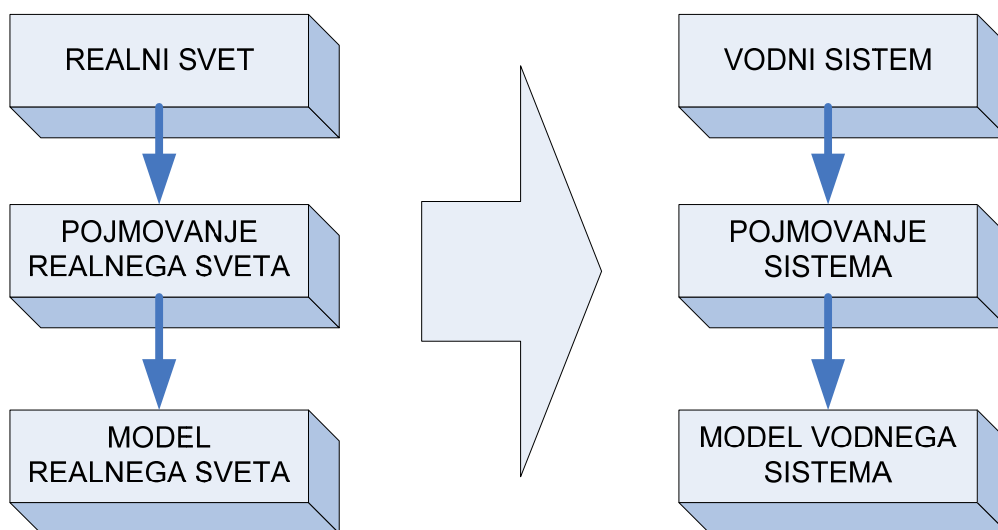
Za umeščanje vodnih sistemov v trirazsežnem prostoru ni mogoče neposredno uporabiti načel, ki se uporabljajo v dvorazsežnem prostoru, saj je nivo abstrakcije realnega sveta nižji, tj. modeli vodnih sistemov v trirazsežnem prostoru imajo geometrijske lastnosti lahko mnogo bolj podobne realnemu svetu. Vendar pa je zaradi nižjega nivoja abstrakcije razpoznavnost elementov vodnega sistema lahko manjša. Npr. nasip ob vodotoku, ki je predstavljen kot telo, je lahko nerazpoznaven za uporabnika, kadar ni določen namen objekta v prostoru. Prav tako nasip nima neposredne asociacije z vodnim sistemom v primeru nizkih gladin v vodotoku, je pa z njim neposredno, funkcionalno in prostorsko povezan ob nastopu visokih voda ter tako neločljivo element vodnega sistema.

Elementi modelov vodnih sistemov morajo med seboj komunicirati, sodelovati in prispevati lastno funkcionalnost pri opravljanju zahtevnejših in iz posameznih aktivnosti sestavljenih opravil v smislu sodelovanja posameznih elementov. Elementi vodnih sistemov vsebujejo postopkovno vedenje, ne samo statične lastnosti, ampak predvsem dinamične lastnosti, ki neizogibno vodijo v multimedijske predstavitve dogodkov in pojavov v realnem okolju.

Lastnosti (atributi) elementov vodnih sistemov so pomembni tako v geometrijskem kot v opisnem zaznavanju elementa v trirazsežnem prostoru. Le-ti služijo za opredelitev, klasifikacijo ali opis obnašanja posameznega elementa modela vodnega sistema v trirazsežnem prostoru. V navideznem okolju se atributi pojavljajo kot izbrane opisne lastnosti posameznih elementov ali pa skupine elementov. Npr. na nasipu so uveljavljeni razni pravni režimi (poplavno območje, vodno zemljišče, ipd.), ki so v navideznem okolju lahko prikazani kot ploskve na površini modela nasipa. Pravni režim je lahko določen kot atribut na mejni ploskvi nasipa ali pa povsem nov geometrijski element (cesta na nasipu), ki je lahko prostorsko povezan z modelom nasipa.

6 KONCEPTUALNI MODEL VODNIH SISTEMOV V NAVIDEZNEM OKOLJU

Realnost je preveč kompleksna, da bi bil njen popolni in detajlni opis primeren za praktično uporabo. Tudi človeški spomin in dojemanje deluje tako, da kompleksne pojme iz okolja reducira v izkustvene objekte. Zato za posamezno področje dela ali izbrani namen običajno uporabimo poenostavljen, a zelo specificiran način za predstavitev realnosti. To dosežemo z modeliranjem realnosti (Slika 37).



Slika 37: Modeliranje realnosti, od vseobsežnosti realnega sveta do uporabniškega, fizičnega modela realnega sveta.

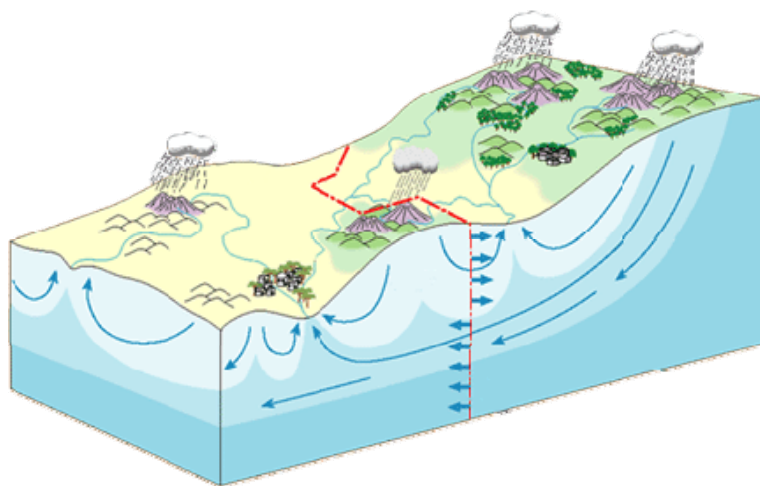
Fig. 37: Modelling of reality, from real word to model of real word.

6.1 Geometrijske lastnosti elementov navideznega okolja

Vsi objekti in pojavi realnega sveta so trirazsežni. To neposredno povzroči, da je najbolj naraven in ustrezen prikaz elementov modela v treh razsežnostih. V trirazsežnem prostoru se pojavljajo različne vrste objektov, ki so povezane s funkcijo, ki jo predstavljajo v prostoru ali vodnem sistemu. Navidezno okolje mora zato vsebovati elemente modelov vodnih sistemov, izdelanih po natančno določenih matematičnih načelih, ki zagotavljajo položajno natančnost in zanesljivost prikazanega vodnega sistema.

6.1.1 Zemeljsko površje

Vodni sistemi so del zemeljskega površja. Zemeljskega površja v širšem smislu. Običajno se zemeljsko površje modelira kot ploskev, oziroma je upodobljena meja med stikom površja in ozračja (ti. relief). Elementi vodnih sistemov pa so umeščeni tudi v podtalju, npr. podzemne vode kot vodna telesa z veliko prostornino (Slika 38). Zato se lahko vprašamo, ali je dovolj primerno prikazovati zemeljsko površje z reliefom oziroma, ali je potrebno obravnavati zemeljsko površje kot volumski trirazsežni element, ki seveda vsebuje tudi manjše elemente npr. različno geološko sestavo tal. Ustrezna aproksimacija včasih je lahko tudi prikaz reliefa (ploskev), podzemne vode pa kot volumski element, položajno pod reliefom.



Slika 38: Trirazsežnost zemeljskega površja.

Fig. 38: Three dimensionality of earth surface.

6.1.2 Trirazsežne zgradbe, naprave in ureditve

Zgradbe, naprave in ureditve predstavljajo grajeno okolje. Zgradbe, naprave in ureditve so elementi v navideznem okolju, ki jih je kot model najlažje nedvoumno prikazovati, saj navadno izhajajo iz geometrijsko določenih trdnih teles prostora, ki so časovno precej neodvisni. Aproksimacija vodnih zgradb in naprav s točkovnimi elementi ni smiselna, saj z

obravnavo točke v treh razsežnostih ne povečujemo stopnje informativnosti. Nekatera GIS orodja, npr. ESRI ArcView 3D Analyst, omogočajo, da kot točkovni element v trirazsežni prostor umestimo 3R znak, ki je izdelan kot CAD/3Ds model. S tem sicer povečamo vizualno informacijo, ne povečujemo pa geometrijske informativnosti geometrijskega zapisa.

Posamezne vodne ureditve pa je mogoče prikazovati s *točkovnimi elementi* v obliki 3R znaka npr. drevesa, obrežno zarast, rabo tal (kulture), ipd., ker z geometrijsko togostjo ni mogoče ponazarjati mnogoterih oblik narave. Ta telesa so sestavljena iz več geometrijskih teles (krogla, kocka, kvader ali tetraeder, prizma, piramida, valj ali stožec) ali pa so to geometrijski elementi s fraktalno zgradbo (Slika 39, vir modela: Dosh 3D). Oblika in velikost sta lahko konstantni ali ploskovno spremenljivi glede na objektni tip in nivo podrobnosti. Točkovni elementi so v trirazsežnem prostoru postavljeni na ploskve ali ovoje teles, pri nesimetričnih 3R znakih pa so tudi usmerjeni.



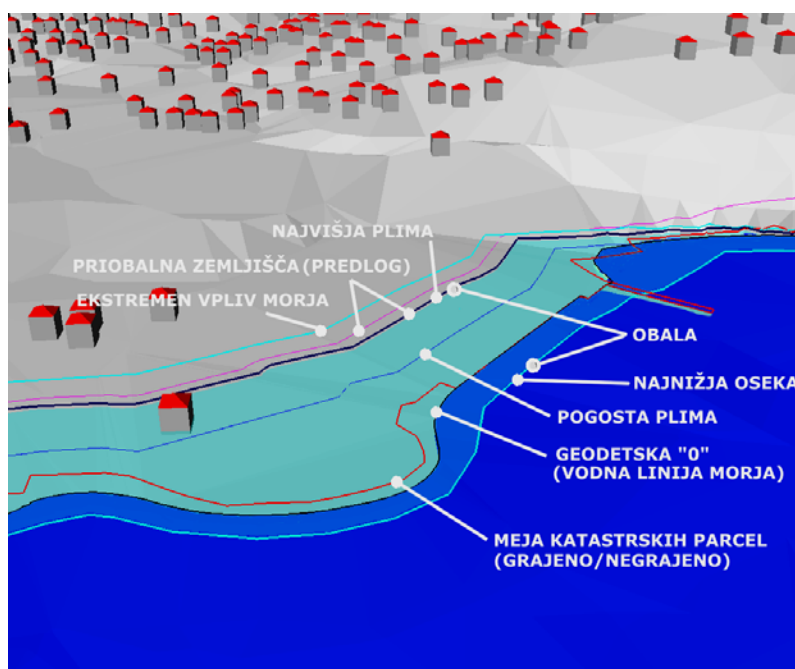
Slika 39: Fraktalni točkovni element – grmičevje (levo) in linijski elementi – cevi (desno).

Fig. 39: Shrubs presented by point element with fractals (left) and
line elements – pipes (right).

Elementi vodnih objektov in naprav s prevladujočo eno razsežnostjo in pretežno nespremenljivima drugima dvema razsežnostma, npr. cevovodi (Slika 39, vir modela: Dosh 3D), so lahko prikazani kot elementi, kjer je ploskev elementa oblikovana okoli linije s pravilnim (ali nepravilnim zaključenim) likom, npr. krožnico. Imenujemo jih *linijski elementi*. Če se element prilega neki ploskvi ali telesu, je lahko podan le horizontalni potek, vertikalni

pa je določen s ploskvijo ali ovojem telesa. Linije se lahko prikazujejo tudi kot trirazsežni elementi. Le-te nalegajo na ploskvi ali obodu telesa, kot npr. meja priobalnih zemljišč, kjer vodno telo morja nalega na reliefu terena ob vodnem telesu.

Ploskovni elementi se lahko uporabljajo za upodabljanje vodnih ureditev in prikaz območja pravnih režimov, saj navadno ti elementi nalegajo na drugo ploskev ali ovoj telesa. Tovrstni elementi so npr. pokritost tal ali območja z različnimi pravnimi režimi npr. obala, priobalna zemljišča (Slika 40, Gosar, 2002, Žagar, 1994), območja varstva vodnih virov, ipd. Navadno so ploskovni elementi prikazani s konstantno višino glede na relief ali konstantno absolutno višino.

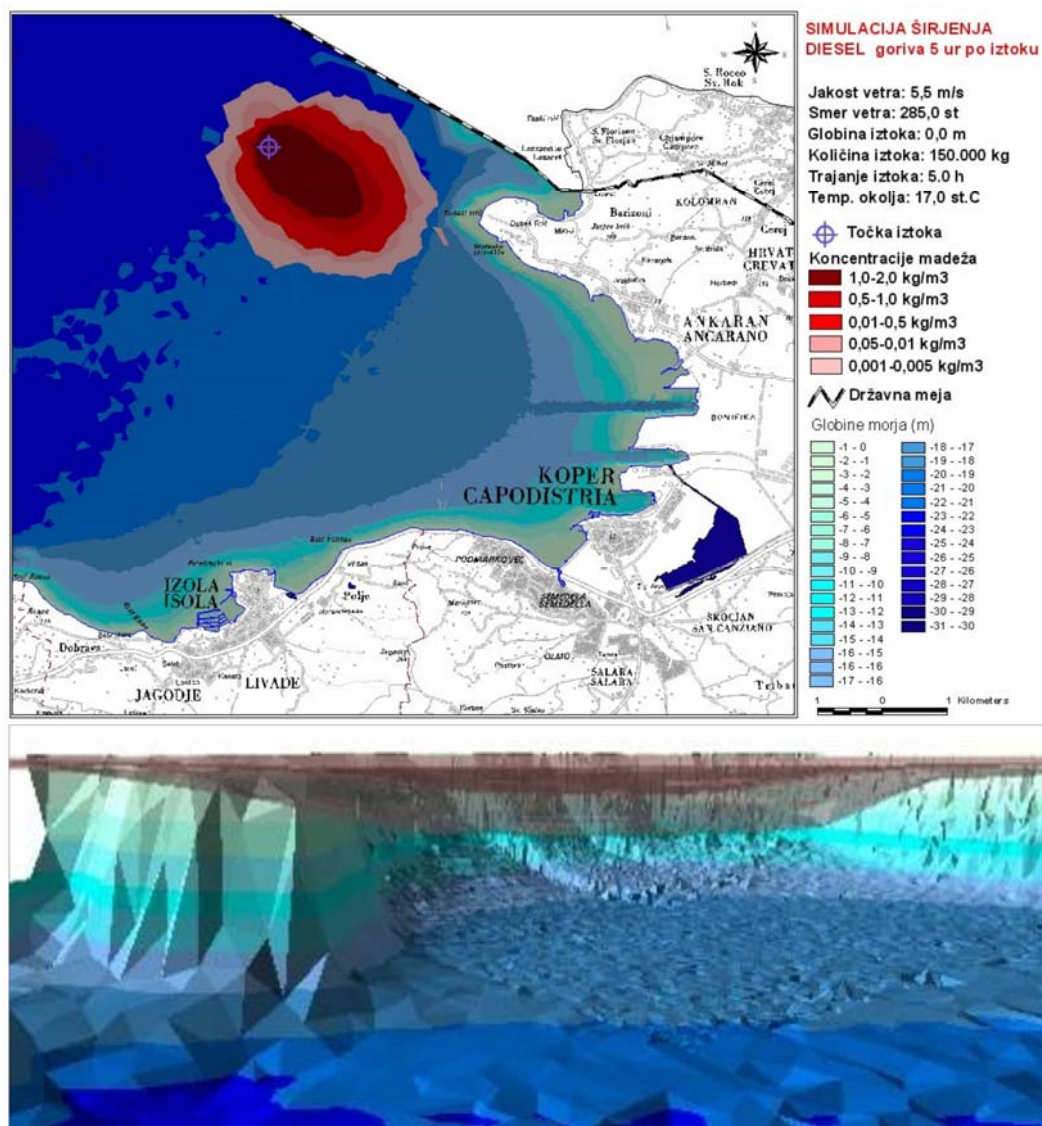


Slika 40: Ploskovni elementi – pasovi obale.

Fig. 40: Surface elements - coast belts.

Za upodobitev *volumskih elementov* je potrebno za vsak objekt posebej določiti njegovo celotno razsežnost v vseh treh razsežnostih. Takšni tipični objekti so grajeni objekti, ki jih zaradi velikosti, pomembnosti in informativnosti ni mogoče prikazovati kot ploskovni ali točkovni element trirazsežnega prostora. Med volumske elemente lahko uvrščamo tudi večja vodna telesa (z večjo maso) npr. jezera, morja ter večje vodotoke (Petrovič, 2001). Prav tako

lahko z volumskimi elementi prikažemo različne koncentracije snovi v vodi, npr. koncentracije naftnih derivatov (Slika 41, Gosar, 2000), ki se v morski vodi v primeru nesreče na morju (Gosar, 2000) širijo po gladini in v globini. V matematičnem hidravličnem modelu je vključen vpliv advekcije, turbulentne difuzije, neenakomerne porazdelitve hitrosti po globini (strižna difuzija), vzgona in izparevanja naftnih derivatov.



Slika 41: Volumski elementi – oblaki različnih koncentracij naftnih derivatov v primeru nesreče na morju (zgoraj: prikaz na karti, spodaj: prikaz v navideznem okolju).

Fig. 41: Volume elements – different oil spill concentrations in sea (above: presentation in map, bellow: presentation in virtual environment).

Modele objektov lahko obravnavamo kot abstrakcijo resničnih objektov. Najbolj pomembna pri definiranju modela je primerna usklajenost med pravilnostjo in prilagodljivostjo. Kot je bilo že prikazano, sta možna pristopa modeliranja objektov in naprav akumulativno modeliranje in proizvodno modeliranje. Najbolj razširjen tip trirazsežnih predstavitev je upodobljen z akumulativnim modeliranjem, ko je objekt definiran z mejnimi elementi: ravne površine, robovi, oglišča so definirana s sečišči ploskev objekta. Dodatno je možno urediti tudi topologijo, ki podaja kako so robovi, ploskve in oglišča povezana med sabo. Pri proizvodnem modeliranju pa objekt sestavljamo iz preprostih osnovnih delov. Rezultat je tog objekt. Za razliko od akumulativnega modeliranja pri proizvodnem modeliranju ni potrebna kontrola, ali je lupina objekta zaključena celota (zaprtost). Modele, izdelane z metodo proizvodnega modeliranja, lahko preoblikujemo v akumulativne modele, medtem ko obraten postopek ne prinese želene rešitve. Smatram, da je treba bodoče razvojne in raziskovalne težnje usmeriti k uporabi proizvodnega modeliranja, saj le-to ponuja delo s pravimi volumetričnimi objekti, ki jih lahko smatramo kot prave navidezne objekte.

6.1.3 Vodni pojavi

Petrovič (2001) je za področje kartografije oblikoval izrazna sredstva v trirazsežnih prikazih. Opredelil je, kaj obsega pojem vodovje (hidrografija) in določil osnovne zahteve pri prikazovanju hidrografije. Te so:

- razvidne morajo biti geografske značilnosti obal, jezer in morij,
- prikazan mora biti rečni sistem v celoti in s posameznimi značilnostmi,
- pri vodnih objektih morajo biti prikazane kvalitativne in količinske značilnosti ter
- pravilno mora biti prikazan odnos med hidrografijo in ostalo vsebino karte.

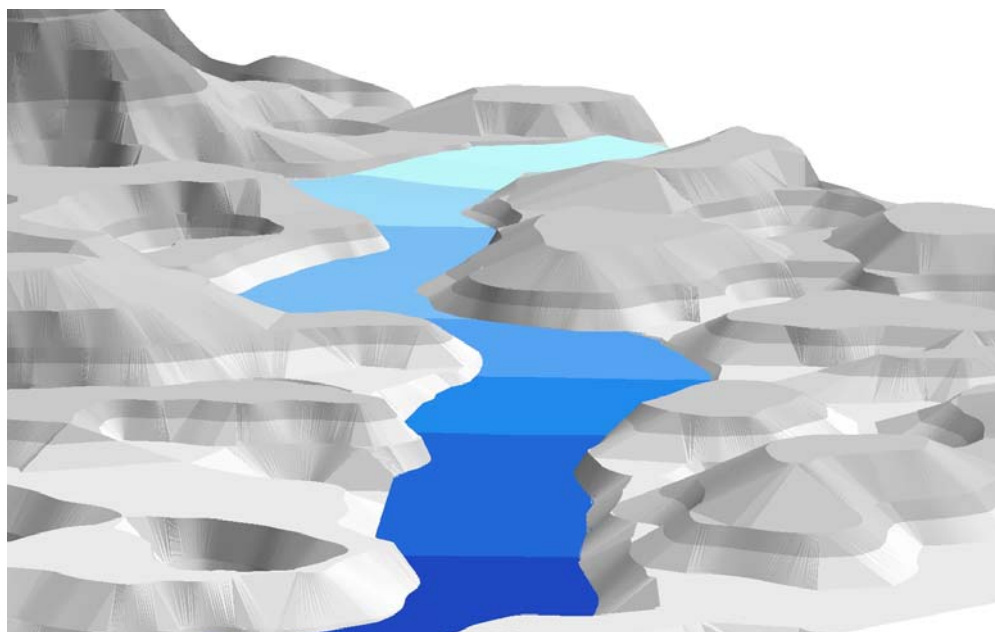
Ugotavlja, da mora biti zagotovljeno popolno ujemanje vodovja z reliefom, torej morajo vodotoki vedno teči po dnu dolin, vodne površine pa morajo vedno imeti popolnoma vodoravno vrhnjo plast (Petrovič, 2001). Za kartografsko oblikovanje izraznih sredstev so navedena načela korektna, vendar pa je uporaba teh podatkov za modeliranje vodnih sistemov pomanjkljiva. Kot je bilo to prikazano v poglavju 4.7.2.2., je gladina že v enodimenzionalnem računu na odsekih med računskimi profili lomljena in predstavlja ploskve z različnim

naklonom. Dosedanja praksa uporabe klasičnih kart in kartografskih podatkovnih virov je pokazala, da kartografska in geografska interpretacija prostora ne dajeta ustreznih podlag za ekstrakcijo podatkov, potrebnih za modeliranje vodnih sistemov. Vsekakor pa klasične karte in kartografski podatki viri dopolnjujejo ali pa omogočajo umestitev vodnih sistemov v širši geografski prostor.

Vodni pojavi so elementi narave. Vodni pojavi so elementi v prostoru, ki navadno nimajo definirane geometrijsko pravilne oblike, zato jih lahko upodabljamo kot ploskovne (tudi lupine) in volumnske elemente. Za naravne objekte uporaba geometrijsko pravilnih teles ni primerna (Petrovič, 2001). Osnovni pristop v upodabljanju vodnih pojavov je, da naj trirazsežni modeli vodnih pojavov sledijo obliki vode, kar pomeni, da je potrebno vseskozi slediti pojavnosti in fizikalnim lastnostim vode. Na primer, vodo v vodotoku lahko prikažemo kot gladino (ploskev) (Slika 42) ali pa celoten volumen vodne mase (lupina, telo). Na sliki (Slika 42) je vidna gladina vode ob nastopu vode manjše verjetnosti, ko voda še ostane v strugi. Kadar je tok vode modeliran z 1R matematičnim hidravličnim modelom, je gladina, sestavljena iz poševnih ploskev različnih vzdolžnih naklonov ter različnih višin v vsakem računskem prerezu. Primerjava med prikazom zemeljskega površja in modelirano gladino prikazuje, da gladina (točneje: naklon gladine) ne sledi popolnoma padcu dna vodotoka. Razlika nastane zaradi različnih vrednosti hitrosti toka vode v posameznih računskih prerezih, tj. kinetičnega člena v energiji prereza, in energijskih izgub vzdolž vodotoka, ki pa so v veliki meri odvisne od hrapavosti brežin.

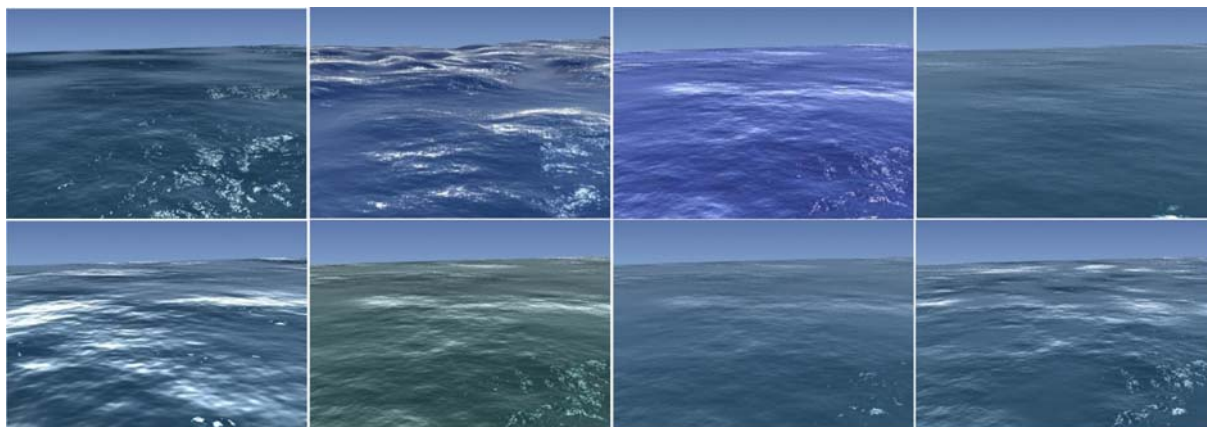
Prikaz dejanske gladine, ki je nagnjena tako v prečni kot v vzdolžni smeri, zahteva določitev vodne črte, tj. oblivanje brežin na vseh bregovih. Zaradi dinamike vodnih mas, ki jo oko zaznava v realnem svetu, je treba tudi v navideznem okolju poudariti dinamiko voda.

Dodatno lahko prikažemo različne (realistične) upodobitve površine gladine vode (Slika 43), ki lahko izhajajo iz hidravličnega modeliranja ali iz umetniških upodobitev gibanja vodne površine. V trirazsežnem prostoru meje naravnega pojava (npr. kraško polje) določa množica pojavov, ki so značilni za kraško polje, npr. ponori, izviri, podzemni tok, razpoklinski vodonosniki, ipd. Prav tako so nekateri vodni pojavi, npr. brzice, slap ipd., del vodotoka in jih ni potrebno obravnavati kot ločen objektni tip (kot npr. v GIS-u).



Slika 42: Prikaz gladine vode modelirane z 1R matematičnim modelom.

Fig. 42: Water surface modelled with 1D mathematical model.



Slika 43: Prikaz različnih realističnih upodobitev gladine vode,
ki naj bi poudarila dinamiko vodnega telesa.

Fig. 43: Realistic presentation of water surface which emphasize dynamic of water body .

6.2 Podatkovna struktura elementov vodnih sistemov

Objektno usmerjeno modeliranje, analiza in načrtovanje, tvorijo proces razmišljanja o reševanju problemov s pomočjo modelov izbrane stvarnosti, ki temeljijo na realnih predstavah

(Blaha et al., 2004). Osnovni koncept predmetno usmerjenega modeliranja je objekt, torej element modela vodnega sistema, ki združuje podatke, postopke in odnose. Objektно usmerjen pristop izrazito loči tipski nivo, ki določa razrede objektov, ter pojavní nivo, ki ga tvorijo dejanski objekti s podatki. V objektно usmerjenem modeliranju se uporablja načelo klasifikacije, kar pomeni, da se objekti z enakim pomenom in sestavo (atributi, obnašanje in relacije) razvrstijo v ustrezne objektne tipe ali razrede.

Standardna klasifikacija vodnih pojavov, zgradb, naprav, ureditev in pravnih režimov ne obstaja, zato je bilo za izhodišče nadaljnjih analiz povzeto razvrščanje po Katalogu vodnogospodarskih objektov in naprav ter vodnih pojavov (Horvat et al., 2001). Ta Katalog je bil izdelan kot široka raziskava standarda DIN 2425 (glej poglavje 4.5) in do tedaj uporabljenih objektnih tipov in podatkovnih nizov s področja gospodarjenja z vodami. Cilj objektnega kataloga je bil, podati širšo definicijo možnih objektnih tipov, ki se pojavljajo v prostorskih podatkovnih bazah, kot ožji cilj pa priprava za rabo na novi digitalni karti v merilu 1:5000.

Katalog vodnogospodarskih objektov, naprav ter vodnih pojavov je bil analiziran tudi glede celovitosti opisa oz. vseobsežnosti, nato pa pripravljen za upodabljanje objektov v dvorazsežnem okolju, npr. za tiskane karte, GIS in CAD. V doktorski disertaciji so uporabljena načela, uporabljena za razvoj objektnega kataloga, vendar pa dopolnjena tako, da so primerna za trirazsežni prostor in to predvsem za razvrščanje elementov vodnih sistemov v objektne tipe in njihovih opredelitev do osnovne klasifikacije objektov v trirazsežnem prostoru.

6.2.1 Objektni tipi vodnih sistemov v navideznem okolju

Objektni tip je abstrakten ali uporabniško določen podatkovni tip, razred (objekta) pa je izvedba določenega objektnega tipa v izbranem programskem okolju. Izbira razredov modela vodnega sistema je poljubna in je odvisna predvsem od namena objektnega modela in značilnosti problemskega področja. Objektni tipi elementov vodnih sistemov v navideznem okolju predstavljajo abstrakcijo, ki za določeno uporabo podajajo pomembne značilnosti in

lastnosti. Vse ostale značilnosti in lastnosti se ignorira ali pa se dopušča nadgrajevanje/dopolnjevanje modela. Vsak objektni tip je načelno določen z neskončnim številom možnih objektov ali posamičnih pojavov.

Prostorske elemente modelov vodnih sistemov lahko v navideznem okolju enotno in strukturirano prikažemo v objektnem katalogu, ki služi za pojasnitev vsebine vodnih sistemov kot dela realnega sveta. Objektni katalog omogoča poenoteno razvrščanje elementov v prostoru v razrede (objektne tipe) za katerikoli podatkovni model na določenem področju obravnave (Šumrada, 2005b). Osnovna razvrščanja po objektnih tipih se izvajajo s klasifikacijsko shemo, ki izhaja iz zaznanih elementov vodnih sistemov. S klasifikacijo objektnega kataloga vodnih sistemov v navideznem okolju podajam tudi možno podrobno razvrstitev vodnih pojavov ter vodnih zgradb, naprav in ureditev za željeno abstrakcijo vodnega sistema, vendar pa je treba, ne glede na abstrakcijo, upoštevati nekatere značilnosti, ki izhajajo iz fizikalnih lastnosti vodnih sistemov. Razvrščanje elementov vodnih sistemov naj bi omogočalo opredeljevati klasifikacijo za vse elemente vodnih sistemov na izbranem območju obravnave modela vodnega sistema.

Metodologija objektnega kataloga podaja možno podrobno razvrstitev vseh pojavov za katero koli sestavljeno abstrakcijo stvarnosti (ti. konceptualni model), ki je dejansko predstavljena v enem ali več nizih prostorskih podatkov. Objektni katalog je zato natančno opredeljen s klasifikacijo. Osnovni nivo klasifikacije v objektnem katalogu predstavlja objektni tip kot abstrakten ali uporabniško določen podatkovni tip. Z objektnimi tipi modelov vodnih sistemov opredeljujemo skupino pomensko enakih objektov, ki imajo enake značilnosti ali informacije in enako vedenje. Razvrščanje elementov modelov vodnih sistemov v objektno tipe daje kot rezultat podroben seznam uporabljene klasifikacije, ki jo je možno opisati v enem ali več nizih podatkov.

Objektni katalog predstavlja najprej zbirko niza pomenskih opredelitev, ki so potrebne za klasifikacijo izbranih stvarnih objektov na nekem področju obravnave, kar lahko neposredno vpliva na razvrstitev modelnih razredov. Objektni katalog zagotavlja način za organizacijo prostorskih podatkov o elementih modelov vodnih sistemov v ustrezne poenotene kategorije

tako, da so razvrščeni podatki čim bolj nedvoumni, razumljivi in uporabni. Razvrščanje lahko služi tudi kot osnova za poenoteno grafično ponazoritev razredov modelov vodnih sistemov.

Umeščanje modelov vodnih sistemov v navidežno okolje se teoretično naslanja na strukturno vsebino objektnega kataloga, saj je opredelitev osnovne klasifikacije objektov in pojavov potrebna za opredelitev nivoja abstraktnosti navideznega okolja in definiranje posameznih elementov, ki so vsebovani v modelih vodnih sistemov. Pomenske opredelitve osnovne klasifikacije modelov vodnih sistemov je potrebno dopolniti z osnovnimi geometrijski atributi (prepoznavnostjo in definicijo objektnega tipa modela vodnega sistema v navideznem okolju), saj bodo ti nadalje vzpodbujali dodajanje opisnih atributov in (geometrijskih) odnosov med elementi modelov vodnih sistemov.

Razvrščanje elementov vodnih sistemov v trirazsežnem prostoru zagotavlja boljše razumevanje sestave in pomena elementov v trirazsežnem prostoru, vendar pa ne opredeljuje geometrijskih lastnosti tako posplošeno in natančno kot je to primer v dvorazsežnem prostoru, tj. s točko, linijo ali poligonom. Klasifikacija elementov vodnih sistemov v trirazsežnem prostoru vsebuje pomen in posplošeno sestavo razredov, njihovo operativnost (vlogo v modelu vodnega sistema) in geometrijske lastnosti.

Za razpoznavo posameznih elementov vodnih sistemov v trirazsežnem prostoru se lahko uporabljajo različni kriteriji, ki so pogojeni z namenom in uporabnostjo pojmovnega modela. Zato je bilo treba za identifikacijo posameznih elementov vodnega sistema v trirazsežnem prostoru izdelati nove kriterije razpoznavne izbranega dela vodnih sistemov.

6.2.2 Podporne vsebine modelov vodnih sistemov v navideznem okolju

Podporne vsebine modelov vodnih sistemov v navideznem okolju tvorijo objekti navideznega okolja, ki vizualno in vsebinsko dopolnjujejo modele vodnih sistemov. Tu se omejujemo predvsem na objekte trirazsežnega prostora, ne analiziramo pa vsebin, ki so značilne za orodja navidezne resničnosti npr. realističen prikaz površin in tekstur, senčenje, zvok, vonj ipd. Prav

tako ni podana analiza barvnih prikazov objektov trirazsežnega prostora ali posameznih ploskev.

Kot je bilo že opisano, načini uporabe in pričakovane zahteve uporabnikov definirajo izdelavo in oblikovanje elementov navideznega okolja. Tako kot ni mogoče določiti vseh oblikovnih geometrijskih lastnosti ali nivojev detajlov za posamezne elemente modelov vodnih sistemov, tako tudi ni mogoče izdelati popolnega objektnega kataloga, ki bi vseboval vse pojave.

Zato glavno vsebino navideznega okolja predstavljajo vodni pojavi, zgradbe, naprave, ureditve in pravni režimi, ki tvorijo modele vodnih sistemov. Razen tega pa je pomembna vsebina, tudi zemeljsko površje, ki je lahko ploskev v prostoru, določena z mrežo trikotnikov ali kvadratov ustrezne gostote, ki pa je odvisna od nivoja prikaza podrobnosti vsebine modelov. Med glavno vsebino so bili zato uvrščeni tudi vsi tisti elementi prostora, ki fizikalno vplivajo na tok vode ali na porazdelitev vode v prostoru, npr. pokritost tal ob nastopu visokih voda vpliva na koeficient hrapavosti.

V sekundarno vsebino lahko uvrščamo tudi druge elemente prostora, ki so v neposrednem vplivu voda ali vplivajo na vodne sisteme oziroma so sploh predmet obravnave v povezavi z vodnimi sistemi. Tako sta npr. pri presoji visokih voda pomembni vsebini tudi zarast (ki upočasnjuje tok vode) in območje poselitve, da lahko prikažemo izpostavljenost visokim vodam. Ta vsebina se lahko s časom dopolnjuje glede na predmet presoje ali raziskav, pri čemer pa lahko model vodnega sistema ostaja nespremenjen.

Zadnja, pomožna vsebina, dopolnjuje in nadgrajuje uporabo navideznega okolja z informacijami, ki jih uporabnik ne potrebuje nujno za obravnavo modelov vodnih sistemov, a so dobrodošle za orientacijo v prostoru npr. koordinatna mreža, iskanje dodatnih možnosti uporabe modela ali za razumevanje robnih pogojev, v katerih deluje vodni sistem. To so pretežno elementi v prostoru, ki so značilni za kartografske ali geografske prikaze in ki niso nujno trirazsežni, a jih je vendarle možno umestiti v trirazsežni prostor. Tak primer so npr. pravni režimi območij ohranjanja narave, ki so določeni na površini terena na parcelno mejo natančno, po višini pa je treba mejo veljavnosti določati posamično.

6.3 Analiza elementov vodnih sistemov v trirazsežnem prostoru

Bistvo mojega dela je analiza elementov vodnih sistemov kot objektov trirazsežnega prostora, ki je potrebna za nadaljnje korake umeščanja modelov vodnih sistemov v navidezno okolje, npr. v 3R CAD, 3R GIS, navidezno resničnost ipd. Analiza je izdelana do nivoja, ki zadošča za obravnavo posameznih objektov trirazsežnega prostora s stališča vpeljave tretje razsežnosti in vsebinskega razvrščanja elementov vodnih sistemov glede na objektne tipe.

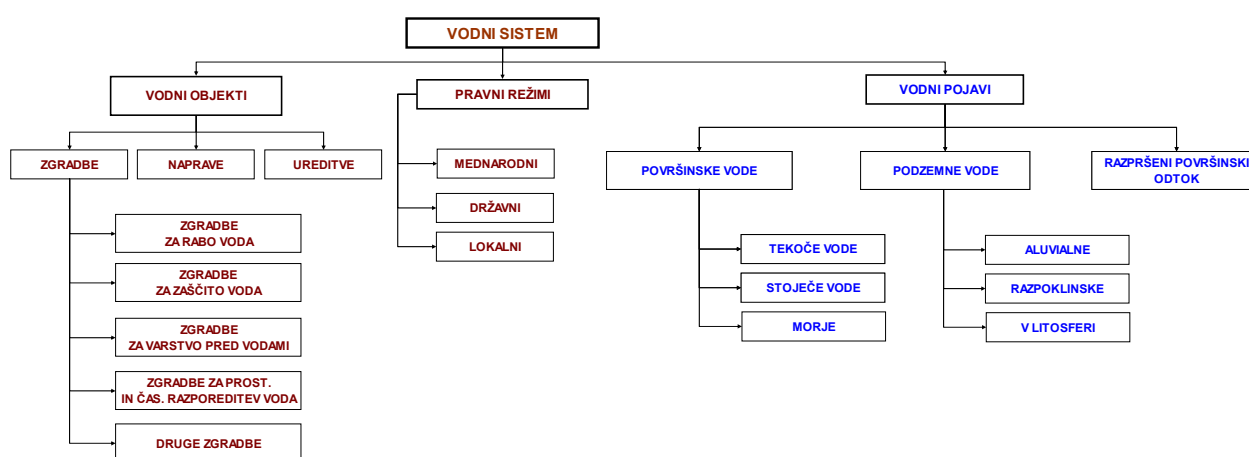
6.3.1 Izhodišča

Za razvrščanje elementov vodnih pojavov je uporabljena Direktiva EU o vodah (2000), ki deli vode (vodne pojave) glede na namen upravljanja na površinske vode (površinska vodna telesa) in podzemne vode (podzemna vodna telesa). Površinska vodna telesa pa se nadalje delijo na tekoče vode, stoječe vode, brakične vode in obalne vode (morja). Za analizo je bilo privzeto prav to razvrščanje, saj je bila na ta način možna obravnavo posameznih vodnih pojavov glede na njihove ožje lastnosti.

Direktiva EU o vodah opredeljuje osnovno tipološko strukturo objektov naravnih virov, ki jih imenuje vodna telesa. Le-ta torej predstavljajo zakonsko izhodišče za opredeljevanje tipologije objektov. Navedena struktura, skupaj z dodatnimi tehničnimi karakteristikami, omogoča dobro klasifikacijsko umestitev naravnih objektov – vodnih teles (Slika 44, Horvat et al., 2001).

Vsak element vodnega sistema ima prav tako določen status vodnega režima, saj vendar z njim definiramo prevladujoč tip vodnega režima oziroma stopnjo antropogenega vpliva. Status naravnega vodnega režima je opisan že v Zakonu o vodah (2002). Tehnični vodni režim pa je njegovo nasprotje in se pojavi tam, kjer se s tehničnimi sredstvi ureja vodni režim na vplivnem območju in je zato antropogeno določen (oziroma spremenjen). Tak primer je npr. Ljubljana skozi mesto, ko se tehnični vodni režim ureja z manipulacijo z zapornicama in je torej nastal zaradi človekovega posega v prostor. Takšen primer je tudi "koncesioniran

odsek vodotoka", kjer je vodni režim spremenjen s tehničnimi pomagali (objekti, naprave, prelivanje, izpuščanje ali zadrževanje voda, ipd.). S tem pa je tudi opredeljeno, da gre za antropogeno spremenjen vodni režim, dovoljen z upravnim aktom (uporabnim dovoljenjem, ipd.). Na ta način je upoštevana tudi Direktiva EU o vodah, ki določa, da je potrebno opredeliti antropogeno spremenjena oziroma "(heavy) modified" vodna telesa ter jih razvrstiti v skupine glede na stopnjo antropogenega poseganja vanje.



Slika 44: Shema razvrščanja elementov vodnih sistemov.

Fig. 44: Classification of water system elements.

Vodne zgradbe so razvrščene v skupine (po Horvat et al., 2001):

- zgradbe za rabo voda,
- zgradbe za zaščito voda,
- zgradbe za varstvo pred vodami,
- zgradbe za časovno in prostorsko razporeditev voda,
- druge zgradbe.

Pri razdelitvi posameznih vodnih zgradb je kot kriterij za uvrščanje v skupino upoštevana primarna raba vodne zgradbe. Kadar je primarna raba določena po kriterijih predpisov s področja voda (Zakon o vodah, 2002 in Pravilnik o določitvi vodne infrastrukture, 2005), govorimo o vodni infrastrukturi, sicer pa o infrastrukturi drugih resorjev na vodah oziroma o vodnih zgradbah v skupni ali posebni rabi. Vprašanje je, ali je takšna stroga razdelitev nujna in upravičena, je pa smiselna, ker ima skoraj vsaka vodna zgradba tudi več sekundarnih oz.

(primarni rabi) podrejenih rab, kar pa je razvidno iz namena gradnje (projektna in upravna dokumentacija). Morda bi bilo bolje, da se razvrščanje ne vrši kot klasifikacija oziroma strogo umeščanje posamezne vodne zgradbe v objektni tip, ki deli vodne zgradbe po namenu, ampak se vodni zgradbi priredi ustrezno področje rabe kot vsebinski atribut.

K vodnim zgradbam in napravam smo dodali še vodne ureditve (npr. biotehnične ureditve brežin), ki so pomemben del vodnogospodarske dejavnosti. S tem je bila upoštevana tudi zakonodaja s področja graditve objektov, tj., da morajo biti zgradbe in naprave izdelani iz elementov, ki imajo lastnosti določene s standardi. Pri ureditvah (npr. vrbov poplet) pa je del elementov sicer lahko izdelan po standardih, ne moremo pa pričakovati, da bo zarast res rasla po standardih. Ureditve, kot posebno kategorijo, je najti tudi v zakonodaji s področja urejanja prostora. Posebno vlogo ima tudi razpršeni površinski odtok, kot vodni pojav, katerega elementi so pomembni za celostno obravnavanje voda in gospodarjenje z vodami, za urejanje odtočnega režima pa so pomembne tudi druge ureditve oziroma rabe prostora, s katerimi se ureja razpršeni odtok, npr. žive meje, ki zadržijo spiranje zemljine, poplavni gozd, zaledne vode kot razpršeni dotok v območje poselitev ipd.

6.3.2 Vodni pojavi

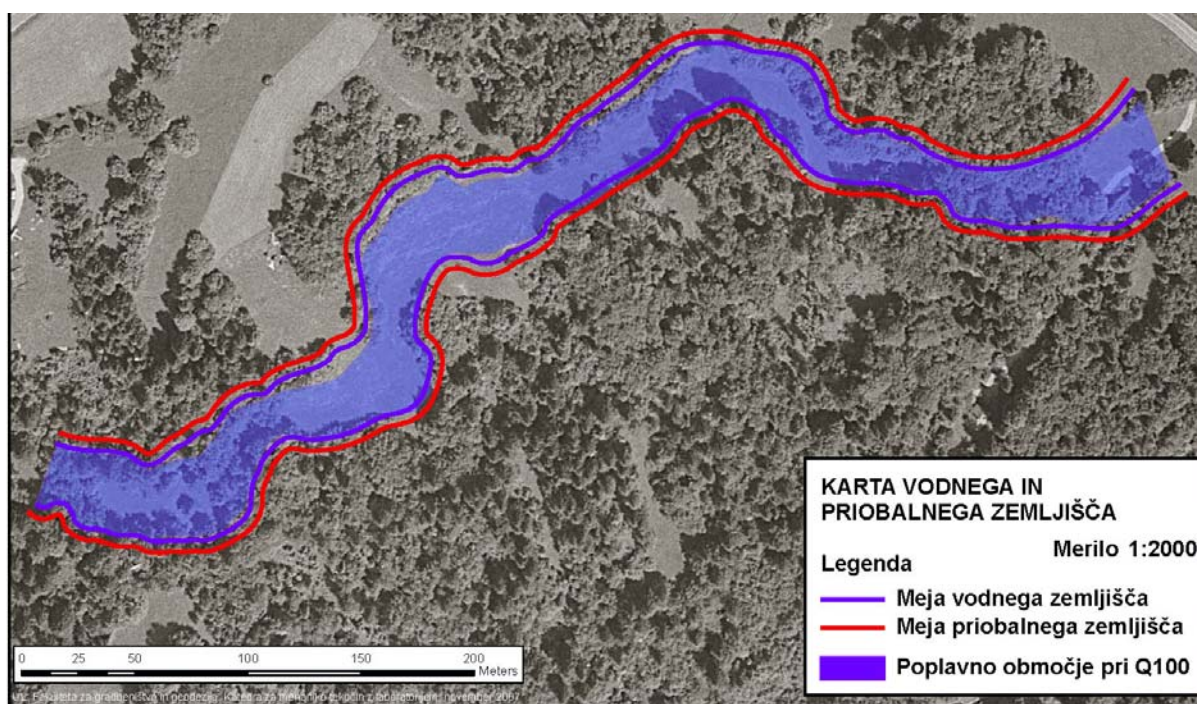
Vodni pojavi so naravni ali po človeku povzročeni elementi v prostoru in času, kjer se voda nahaja v tekočem ali trdnem stanju. Abstrakciji vodnih pojavov v dvorazsežnem okolju (npr. GIS, CAD) in trirazsežnem okolju sta vsebinsko in topološko različni.

V dvorazsežnem okolju se prikazujejo posamezni vodni pojavi razdrobljeno, saj moramo zaradi redukcije modela vodnega sistema v dvorazsežni prostor klasifikacijske razrede razdeliti na vsebinske ali funkcionalne dele. Razvrščanje vodnih pojavov tako ne sledi funkcionalni shemi modelov vodnih sistemov, ampak nas zanimajo predvsem osnovne informacije o posameznih objektnih tipih, tj. njihova umestitev v prostor in opisne lastnosti. Tako lahko objektne tipe vodnih pojavov v dvorazsežnem prostoru za primer tekočih voda prikažemo z zaključenimi poligoni, kot (Slika 45, Gosar et al., 2008a, Rak et al., 2008):

- območje tekočega površinskega vodnega telesa,

- strugo tekoče vode,
- poplavljanje (poplavno območje) tekoče vode,
- brzico,
- slap,
- naplavišče tekoče vode,
- erozijsko žarišče tekoče vode,
- vodno zemljišče (in vodno parcelo) in
- priobalno zemljišče tekoče vode.

Kadar se nahajamo v dvorazsežnem prostoru, je abstrakcija geometrijskih podatkov potrebna zaradi prehoda v dvorazsežni prostor, tj. najprej zmanjšanje ene razsežnosti, nato pa drobljenje posameznih vsebin po slojih, ki predstavljajo enega ali več objektnih tipov (Slika 46, vir podlage: GURS).

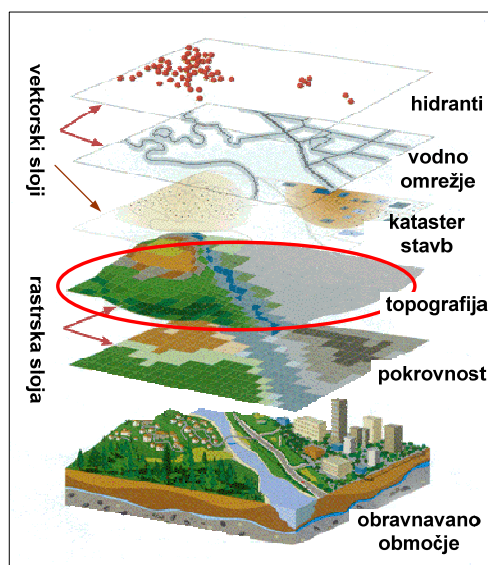


Slika 45: Karta vodnega in priobalnega zemljišča ob Obrtni coni Predstruge.

Fig. 45: Water and near water land near Obrtna cona Predstuge.

V trirazsežnem prostoru so vodni pojavi prikazani z dejansko geometrijo prostorninske oblike (telo, lupina), kar pa ne pomeni, da jih lahko neposredno "preslikamo" iz realnega okolja.

"Podobo" iz narave je treba obravnavati kot (del) funkcionalno celoto, zato je treba opraviti najprej razgradnjo na vsebinske ali funkcionalne dele. Pri tem se upoštevajo načela modeliranja (matematični modeli, podatkovno modeliranje), s katerimi je mogoče razbrati funkcijske lastnosti in funkcijske povezave znotraj vodnih pojavov in relacij na druge vodne pojave.



Slika 46: Metodologija abstrakcije modela prostora na dvorazsežni prostor GIS sistemov.

Fig. 46: Abstraction methodology of space in 2D GIS systems.

6.3.2.1 Tekoče vode

Tekoče vode so površinske vode v hidrografske mreži, ki tečejo zaradi razlike težnostnega potenciala. Odsek vodotoka tudi v trirazsežnem okolju vsebuje vrsto elementov, ki so pomembni za pravilno interpretacijo vodotoka z vsemi njegovimi fizikalnimi, ekonomskimi in pravnimi lastnostmi. Geometrijska interpretacija trirazsežnega elementa in njena lega v prostoru je le ena od lastnosti vodnih pojavov. Rabo prostora, kopnega in vodnega okolja, je namreč potrebno prilagoditi naravnim danostim oz. vodnemu režimu morja in priobalnih zemljišč, kot jih prikazuje Slika 47 (Steinman et al., 2002). Celostni pristop, kjer se obravnavajo vsi vidiki, je tudi osnovno vodilo vseh mednarodnih konvencij, ki pa hkrati zahtevajo, da se izdelajo tudi analize o gospodarnosti z vodo povezanih sprejemljivih dejavnosti. Šele oboje skupaj, usklajene naravne danosti in smotrni razvojni cilji, lahko

služijo kot podpora pri odločanju, kako doseči trajnostno gospodarjenje z vodami. Zato morajo elementi modelov vodnih pojavov, poleg lege v prostoru in ustrezne geometrije, omogočati tudi interpretacijo dinamike, potenciala, količine in kakovosti vode.



Slika 47: Osnovne značilnosti vodnega režima.

Fig. 47: Basic characteristics of water regime.

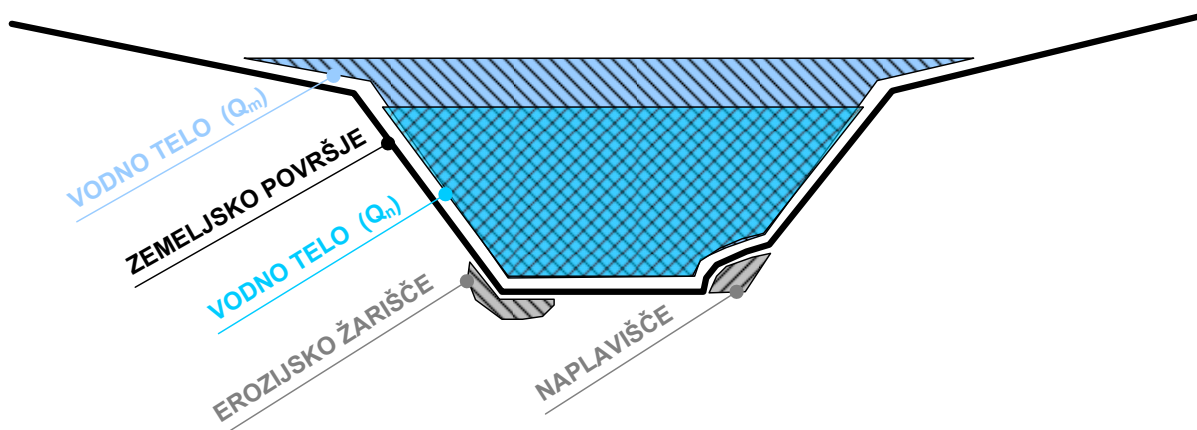
Voda v tekočem agregatnem stanju svojo obliko prilagodi "posodi". V primeru vodotoka kot tekoče površinske vode predstavlja "posodo" struga kot del plašča, ki je v stiku s terenom (zemljiščem), zaključni del plašča vodnega telesa pa predstavlja prosta gladina vode kot tisti del vodnega telesa, ki je v stiku z ozračjem. Velikost struge je odvisna od dinamike vodnega toka (mirni, deroči tok) in količine vode v strugi. Tako je praviloma ob visokih vodah struga večja kot ob nižjih vodah, dodatno dinamiko pa povzroča npr. valovanje. Ob tem je treba rešiti še nekatera vprašanja: Ali je struga samostojen element prostora ali je del terena, reliefa, zemeljskega površja? Ali struga prekinja kontinuiteto površja?

V literaturi nisem zasledil, da je zemeljsko površje prekinjeno, saj je obravnavano kot zgornji del litosfere⁴. Zato moramo za nadaljnje delo upoštevati, da je struga tekoče vode del površja, saj so meje npr. vodnega zemljišča, priobalnih zemljišč ipd. določene s predpisom. Vodno zemljišče lahko na primer ob presahnitvi vode v vodotoku še vedno predstavlja "posodo" ali pravni režim, ki zagotavlja rezervacijo za vodne pojave v prostoru. Zato smatram, da ni

⁴ Litosfera je kompaktna zunanja lupina kamnitega planeta. Na Zemlji litosfera vključuje skorjo in zgornji del plašča. (vir: Wikipedija)

potrebno v trirazsežnem prostoru enoznačno uveljavljati struge vodotoka kot poseben element površja, saj zaradi dinamičnih lastnosti površinske vode ni mogoče ustrezno definirati takšnega prostorskega elementa. Zato bi bilo najbolje, če bi poznali celotno topografijo, tj. zemeljsko površje in s tem tudi geometrijo struge v celoti. Od trenutnih odtočnih razmer je namreč vsakokrat odvisno, koliko vode iz vodotoka "zaliže" hidrografsko mrežo.

Nasprotno pa predlagam, naj se uveljavi *vodno zemljišče* vodotoka (Slika 48, Opomba: pri pretoku $Q=0$ je prostornina lahko večja od 0 npr. ostanejo luže ipd.) kot del zemeljskega površja s pravnim režimom. Pri tem je treba ločiti vodno zemljišče (s pravnim statusom) od parcele vodnega zemljišča (tj. vodno parcelo), zavedene v zemeljskem katastru. Na zemeljskem površju se lahko prikažejo tudi druga, pojmovno različno definirana območja: brežine, dno korita (območje omejeno z levo in desno brežino), talveg (linija najnižjih točk dna korita) ipd.



Slika 48: Elementi tekočih voda, prikazani v prerezu vodnega telesa (vodotok v desni krivini).

Fig. 48: Surface water (river) elements in cross section of water body (river in right curve).

Površje na območju vodnega zemljišča, priobalnih zemljišč in poplavnih zemljišč prekriva *vodno telo* vodotoka v skladu z različno dinamiko parametrov vodnega režima. Vodno telo je v naravi (navadno) nepravilen volumski trirazsežni element, katerega velikost je v stiku z zemeljskim površjem določena. Manj opredeljena je pri gibljivem dnu, ko vlečna sila vode transportira še del ostenja (npr. prod). V stiku z atmosfero pa je gladina, ki je določena z dinamiko glavnega dela vodnega telesa, na njej pa se lahko pojavljajo procesi zaradi drugih vplivov, npr. valovanje, obtekanje objektov v vodi, ipd. *Gladina* torej ni horizontalna ravnina,

ampak je odvisna od dinamike toka in vplivov na tekoče površinske vode. Zato se gladina, kot možen element modela vodnega sistema, ne more prikazovati s horizontalno ali poševno ploskvijo ampak zgolj z lupino, tj. s plaščem vodnega telesa, ki je v stiku z ozračjem. Razsežnost *vodnega telesa* oz. širino *gladine* npr. glede na količino vode, določa razsežnost *poplavnega območja*.

Vodno telo je torej za potrebe te doktorske disertacije definirano in obravnavano drugače kot v Direktivi o vodah (2000) in dokumentih Skupne strategije za implementacijo Direktive o vodah (2006), kjer je to sinonim za upravljanje s povodjem. Vodno telo je v tej nalogi element v trirazsežnem prostoru, ima topološko obliko telesa, voda kot substanca predstavlja pretežen del prostornine in ima funkcijske povezave z drugimi elementi (npr. prod, vegetacija) v trirazsežnem prostoru. Takšno definicijo privzemam v definicijah vodnih teles vseh drugih vodnih pojavov.

Različni vodni pojavi, npr. brzice, slap, brakične vode, so sicer uveljavljeni elementi vodnih pojavov, ki predstavljajo geografske značilnosti ali strokovno opredeljene značilnosti s področja vodarstva, smatram pa, da to niso samostojen element modelov vodnih sistemov. Običajno pri analizah, npr. v hidravličnih izračunih, ne poudarjamo, da je del tekoče površinske vode brzica, pač pa je to samodejno vključeno v izračune, kadar nas zanimajo fizikalne lastnosti toka vode in vplivov na površje zemlje. Dodatno je možno vodno telo zaradi diskontinuitete lastnosti vodnega telesa, opremiti še z opisnimi atributi, ki bi pomensko opredeljevali tovrstne vodne pojave.

V in ob vodotoku nastajajo različni vodni pojavi, povzročeni zaradi dinamike, potenciala ali kakovosti vodnega telesa, npr. naplavišča, erozijska žarišča, posebni biotopi ipd. Smatram, da je vse to mogoče zajeti z modeli procesov. Ali takšni vodni pojavi določajo površino vodnega telesa in naležno vodno zemljišče oz. ali ti vodni pojavi ležijo kot volumski elementi nad ali pod zemeljskim površjem in na naležnem vodnem zemljišču? Hidravlični modeli v računih upoštevajo geometrijo vodnega telesa v stiku s površjem, zato je ustrezna umestitev, npr. naplavišč in erozijskih žarišč, pod zemeljsko površje. Prav tako je možna interpretacija, da je erozijsko žarišče vsaka zemljina, ki ni erozijska osnova, saj je verjetnost erozije na teh zemljinah stalno prisotna. In obratno, na erozijski osnovi je vedno možen pojav naplavišča.

Opis dinamičnih pojavov pod gladino vode je lahko zapleten, vendar je v modeliranju hidravličnih lastnosti in premeščanja plavin pomemben.

Tekoče vode so v modelih vodnih sistemov predstavljene z osnovnimi elementi:

- vodno telo (glede na pretok ali gladinsko stanje),
- naplavišče in erozijsko žarišče ter z

izpeljanimi elementi, naleznimi na zemeljskem površju:

- vodno zemljišče (glede na pravila stroke ali pravni predpis),
- poplavno zemljišče,
- pribrežno zemljišče (tekoče vode imajo brežine, stoječe pa obalo),
- geomorfološki prelom brežine,
- brežina,
- dno vodotoka,
- talveg idr.

Takšna zasnova elementov modelov tekočih voda v trirazsežnem okolju omogoča različne izpeljane informacije za gospodarjenje z vodami in hidravlično modeliranje tekočih voda, npr. za:

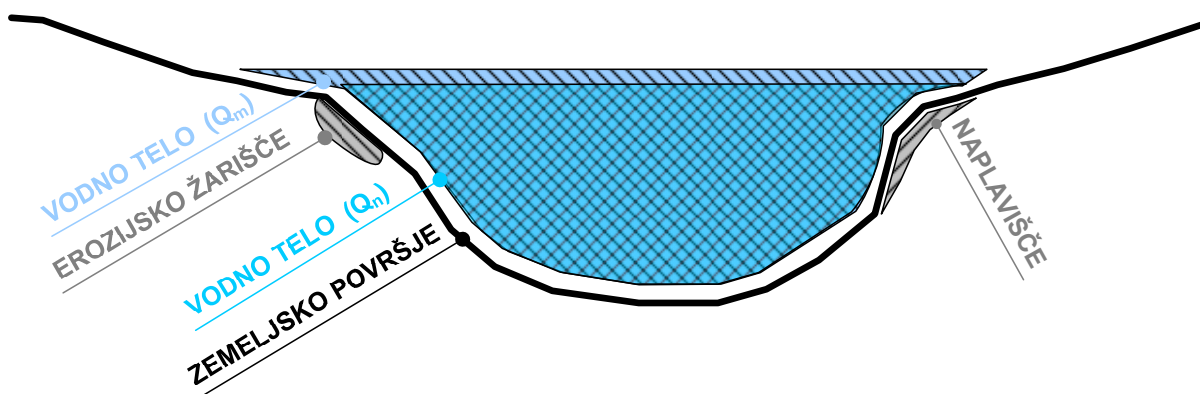
- določitev geomorfološkega preloma brežine, določitev vodnega zemljišča tekočih voda, določitev območja nevarnosti zaradi škodljivega delovanja voda;
- ker je vodno telo predstavljeno kot volumski element, je mogoče izdelati matematične modele, ki obravnavajo izmenjavo vode med npr. vodotoki in podzemnimi vodnimi telesi;
- obravnavo vodnega telesa kot volumskega elementa, kar omogoča bilančne račune količine vode (npr. sprememba zaradi izhlapevanja, odvzemov ali izpustov);
- spremljanje geomorfoloških lastnosti vodotoka, na podlagi sprememb pa določitev erozijskih žarišč in naplavišč, bilance sedimentov idr.

Tekoče vode so funkcionalno povezane z drugimi vodami in sistemi. S prikazanim pristopom je možno uveljavljati funkcionalne povezave med vodnimi telesi tekočih voda in drugimi

vodnimi telesi. Tako lahko zagotavljamo kontinuiteto vodnega toka in neprekinjeno obravnavo toka vode v obravnavanem modelu vodnega sistema.

6.3.2.2 Stojee vode

Stojee vode so površinske vode v kotanjah oz. vdolbinah zemeljske površine, nastale, ko voda v tekočem agregatnem stanju zapolni "posodo", ki ji daje svojo obliko. Stojee površinska voda, npr. jezero, je na dnu omejena s plaščem, ki ga določa korito stojee vode, na stiku z atmosfero pa z gladino. Velikost korita stojee vode je prav tako odvisna od dinamike in količine vode v stojee površinski vodi, a je ta dinamika običajno manjša kot npr. v vodotoku. Geometrija dna pa zaradi dinamičnih lastnosti pritokov in iztokov ni stalna in je pogojena tudi z višino nihanja gladine. Mejo dna predstavlja presek gladine in zemeljskega površja. Podobno kot je opredeljena tekoča voda, v trirazsežnem prostoru tudi korito stojee vode predstavlja zemeljsko površje, saj so meje vodnega zemljišča, priobalnih zemljišč ipd. določene s predpisom. Zato v trirazsežnem prostoru ni treba uveljavljati korita stojee vode kot posebnega elementa zemeljskega površja. Predlagam, da se tudi za stojee vodo uveljavi *vodno zemljišče* stojee vode (Slika 49), ki ponazarja sicer pravno (ali kako drugače znotraj različnih strok) določen del zemeljskega površja. Tudi k telesu stojee vode se na zemeljskem površju lahko definirajo druga, pojmovno različno definirana območja, npr. brežine, priobalni pas ipd.



Slika 49: Elementi stojeeh voda prikazani v prerezu vodnega telesa.

Fig. 49: Surface water (lakes) elements in cross section of water body.

Površje na območju vodnega zemljišča, priobalnih zemljišč oz. poplavnih zemljišč prekriva torej *vodno telo* z dinamičnim vodnim režimom, ki je lahko naravni ali umetni. Vodno telo stoječe vode je torej v naravi nepravilen volumski trirazsežni element, katerega velikost je v stiku z zemeljskim površjem določena. V stiku z atmosfero je lahko gladina določena še z različnimi drugimi fizikalnimi procesi npr. dvig gladine na enem delu jezera zaradi vetra, valovanja ipd. Tudi vodno telo stoječe vode nima horizontalne gladine, je pa le-ta manj podvržena raznim dinamičnim vplivom kot npr. vodotok. Poplavno območje stoječih voda je določeno z razsežnostjo vodnega telesa ob visokovodnem stanju v stiku z atmosfero.

Vodni pojavi, ki nastajajo v in ob vodnem telesu stoječe vode zaradi naravne dinamike ali antropogenih vplivov (npr. plovba), so upoštevani kot procesi. Enako kot v primeru tekočih voda tudi hidravlični modeli stoječih voda upoštevajo geometrijo vodnega telesa v stiku z zemeljskim površjem, zato je ustrezna umestitev zaplavnih površin in erozijskih območij stoječe vode pod zemeljskim površjem.

Stoječe vode so v modelu vodnega sistema predstavljene z naslednjimi osnovnimi elementi:

- vodno telo (gladinsko stanje),
- naplavišče in erozijsko žarišče ter z

izpeljanimi elementi, naležnimi na zemeljskem površju:

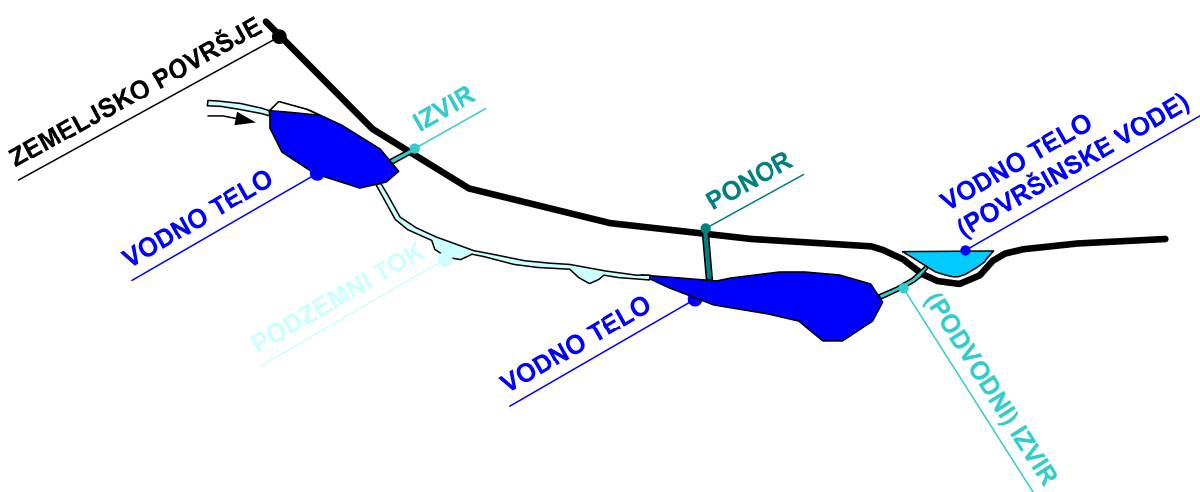
- vodno zemljišče (glede na pravila stroke ali pravni predpis),
- poplavno zemljišče,
- priobalno zemljišče,
- geomorfološki prelom brežine,
- obala,
- korito stoječe vode idr.

Primerjava zasnove modelov vodnih sistemov v trirazsežnem prostoru za tekoče vode in za stoječe vode ponazarja identičnost osnovnih elementov in le majhne razlike v izpeljanih elementih, naležnih na zemeljskem površju.

6.3.2.3 Podzemne vode

Podzemne vode so vode, ki se nahajajo pod površjem zemlje, med njimi in površjem zemlje pa je plast zemljine ali kamenine. Pod zemeljskim površjem je tok vode lahko tok s prosto gladino ali pa tok pod tlakom. Oblika podzemnega vodnega telesa je zelo odvisna od vrste zemljine, hribine ali kamenine, v kateri ali ob kateri se nahaja vodonosnik. Predvsem v kraškem svetu pa se lahko oblikujejo podzemni tokovi, v katerih tok spreminja lastnosti, zato se izmenjujejo lastnosti osnovnih hidravličnih elementov, npr. preliv, tok pod tlakom v cevi, zadrževalnik, ipd.

Vodonosnik je geološka formacija (plast), ki zaradi poroznosti (med zrni zemljine) ali razpoklinske poroznosti (kamenine) vsebuje gravitacijsko vodo. V geološki formaciji se torej oblikuje vodno telo podzemne vode (vodonosnik) kot volumski element. Vodnega telesa ni mogoče povzeti kot lupino, saj je v vseh razsežnostih prostora nepravilna (Slika 50). Vodna telesa površinskih voda prevzamejo na stiku z zemeljsko površino obliko le-te, vodnim telesom podzemnih voda pa obliko navzven določajo neprepustne geološke plasti in prosta gladina, navznoter pa zrna materiala (npr. prodni vodonosnik), ki jih voda obliva in obteka. Zato ni smiselno definirati elementa "posoda" vodonosnika, temveč le sistem podzemnih vodnih teles, povezanih s podzemnimi tokovi.



Slika 50: Elementi podzemnih voda prikazani v prerezu vodnih teles.

Fig. 50: Groundwater elements in cross section of water bodies.

Podzemni tok lahko povezuje različna vodna telesa podzemnih voda. Lahko je oblikovan kot tok s prosto gladino ali tok pod tlakom. Obliko toka vode določajo količine vode, hidravlični upor vodnemu toku idr., kar vse oblikuje vodno telo podzemnega toka. Podzemni tok je v navideznem okolju predstavljen kot telo.

Izvir je naravni iztok iz podzemne vode na stiku med podzemnimi in površinskimi vodami (Horvat et al., 2001). Po tej definiciji je izvir v trirazsežnem prostoru predstavljen kot ploskev na zemeljskem površju, vezana na območje izvira. Ta ploskev predstavlja (značilen) ločilni rez med dvema telesoma, saj izvir povezuje vodonosnik ali podzemni tok z vodnimi telesi površinskih voda. Ker pa je treba zagotoviti še opis funkcionalne povezave, si izvor predstavljam kot "šop cevi" med vodonosnikom in podzemnim tokom ter površinskimi vodnimi telesi, saj s tem dosežemo neprekinjenost toka voda med enimi in drugimi vodnimi telesi. Izvir lahko potemtakem definiram kot naravni tok vode, ki povezuje vodonosnik ali podzemni tok s površinskimi vodami. Zakaj predpostavljam, da ni možen neposredni iztok iz vodonosnika v vodno telo površinskih voda? Izvir je v trirazsežnem prostoru predstavljen kot telo, zato ga lahko obravnavamo z vsemi atributi, ki jih ima kot vodno telo. Če tega ne bi storili, bi morali vpeljati element (krivočrtne) ploskve, ki bi ji pripisovali potrebne lastnosti – npr. pretok skozi 2R ploskev.

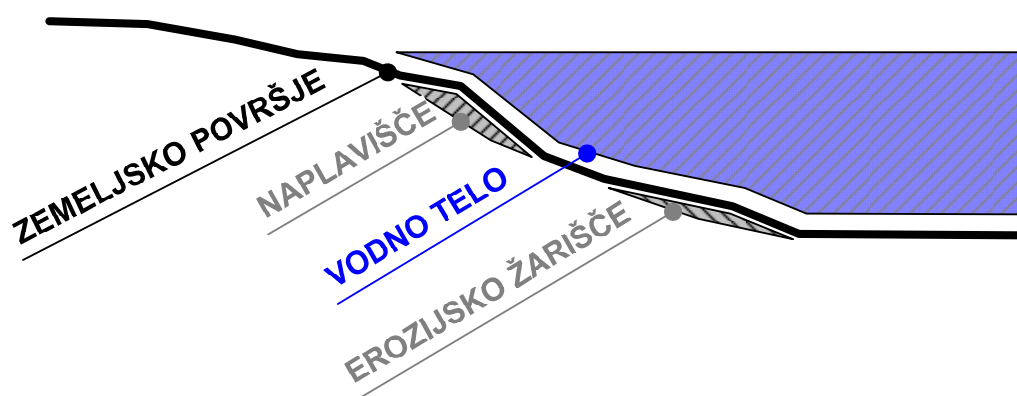
Izvir in ponor sta vodna pojava, katerih funkciji toka vode sta obratno usmerjeni, geometrijski prikaz v prostoru pa je identičen. Ponor definiram kot naravni ali umetni tok vode, ki povezuje površinske vode z vodonosnikom ali podzemnim tokom. Tako kot izvir tudi ponor ponazorimo kot šop cevi med površinskimi vodami in podzemnimi vodami, zato je ponor v trirazsežnem prostoru predstavljen kot telo, torej z vodnim telesom.

Ker lahko vse oblike podzemnih voda (vodonosnik, podzemni tok, izvir in ponor) v trirazsežnem prostoru prikazujemo kot telesa, jih lahko posledično v navidežno okolje umestimo s samo enim osnovnim elementom, tj. vodnim telesom. Lega teh vodnih teles je vedno pod zemeljskim površjem. Navidežno okolje je trirazsežna predstavitev prostora, zato je z lego določena tudi primarna razvrstitev v razred podzemne vode.

6.3.2.4 Morje

V dvorazsežnem prostoru so morje in z njim povezani elementi s področja celinskih voda obravnavani kot obalne vode. Obalne vode so površinske vode, merjene od tiste črte na kopnem, katere vsaka točka je oddaljena eno navtično miljo na morsko stran, od najbližje točke na osnovni črti, od katere se meri širina teritorialnih voda, oziroma, kjer je to primer, do zunanje meje brakičnih voda. V trirazsežnem prostoru takšna definicija ni več ustrezna. Tudi takšna administrativna delitev vodnega telesa ni več sprejemljiva glede na pravila EU (npr. Okvirna direktiva o morski strategiji). Predlagam, da se morje obravnava kot enovito vodno telo, ki je sicer lahko omejeno z državno mejo, kar pa še vedno omogoča združevanje vodnih teles v okviru regijskih morij. Morje je zato upoštevano kot razsežno območje slane vode, ki je povezano z oceanom.

Čeprav je lahko globina morja zelo velika, pa je tudi morje na svojem dnu omejeno z litosfero, ki predstavlja zemeljsko površje (Slika 51). Ponovno lahko privzamemo, da je dno morja definirano s stikom morja in zemeljskega površja. Morje je zelo dinamično na svoji gladini zaradi valovanja, ki je povzročeno zaradi naravnih dejavnikov vetra ali pa plovil. Zgradbe na morju oz. na stiku morja in zemeljskega površja, tj. na obali ali na dnu, pa so podvrženi velikim fizikalnim in kemijskim vplivom delovanja morja.



Slika 51: Prerez skozi elemente morja v trirazsežnem prostoru.

Fig. 51: Marine water elements in cross section of water bodies.

Kot dno morja je tako upoštevano zemeljsko površje. Zaradi dinamike morja in pritokov s kopnega se prav tako lahko pojavijo erozijska žarišča ali območja odlaganja. Predlagam, da se podobno kot za tekoče in stoječe vode uveljavi *vodno zemljišče* morja kot del površja s pravnim režimom. Vodno zemljišče se lahko, glede na dinamiko morja, razlikuje od katastrske parcele morja. Na obvodnem delu zemeljskega površja pa se lahko prikažejo tudi druga različno definirana območja npr. obala ali priobalna zemljišča, kljub temu, da je obala definirana kot pas zemljišč, torej del zemeljskega površja.

Slovensko morje se v procesih gospodarjenja z vodami deli na več vodnih teles, glede na stopnjo antropogenih vplivov v preteklosti in bodočega doseganja dobrega stanja voda. Tudi v trirazsežnem prostoru naj bo zato morje, zaradi različne obravnave posameznih območij morja, sestavljeno iz več vodnih teles. Vendar pa se morajo vodna telesa morja obravnavati celovito, kot en sistem fizikalnih, kemijskih in drugih lastnosti morja. Tudi gladina morja se ne more privzeti kot horizontalna ploskev, saj je gladina zaradi vpliva valov ob obali ali sil vetra lahko mnogo višja kot npr. gladina nekaj deset metrov od obale.

Vodno telo morja je torej omejeno na dnu z zemeljskim površjem, na stiku z atmosfero pa z dinamično gladino ter višino valov ob obali. Valovanje zaradi plovil se v umeščanju vodnega telesa morja v navidezno okolje zanemarja, razen če je kdaj izražena potreba po računu vplivov tovrstnih valov na obalne zgradbe. V modeliranju gladine se ne sme zanemariti vpliva bibavice, saj lahko znaša nekaj metrov višine, kar je lahko v nadaljnji obravnavi vodnega telesa morja in pri modeliranju vplivov na druga vodna telesa ali objekte v prostoru bistveno. Glede na opredelitev, da lahko morje zaradi procesov gospodarjenja z vodami vsebuje več vodnih teles, opredeljujem tudi laguno (z morjem preplavljeno zemljišče, ki se zajeda v kopno) kot vodno telo morja.

Različni procesi vpliva morja so vidni pretežno v bibavičnem pasu, npr. erozijska območja in zaplavna območja, kar pa ne pomeni, da tovrstni procesi ne nastajajo tudi v večjih globinah morja, kjer se prav tako vrši transport sedimentov, ki lahko vpliva na vodne zgradbe, npr. na podmorske izpuste. Erozijska območja in zaplavna območja se umeščajo v trirazsežnem prostoru pod zemeljskim površjem, saj definirajo geometrijo spodnjega roba vodnega telesa morja.

Morje je v modelu vodnega sistema predstavljeno z naslednjimi osnovnimi elementi:

- vodno telo,
- naplavišče in erozijsko žarišče, ter z

izpeljanimi elementi, naleznimi na zemeljskem površju:

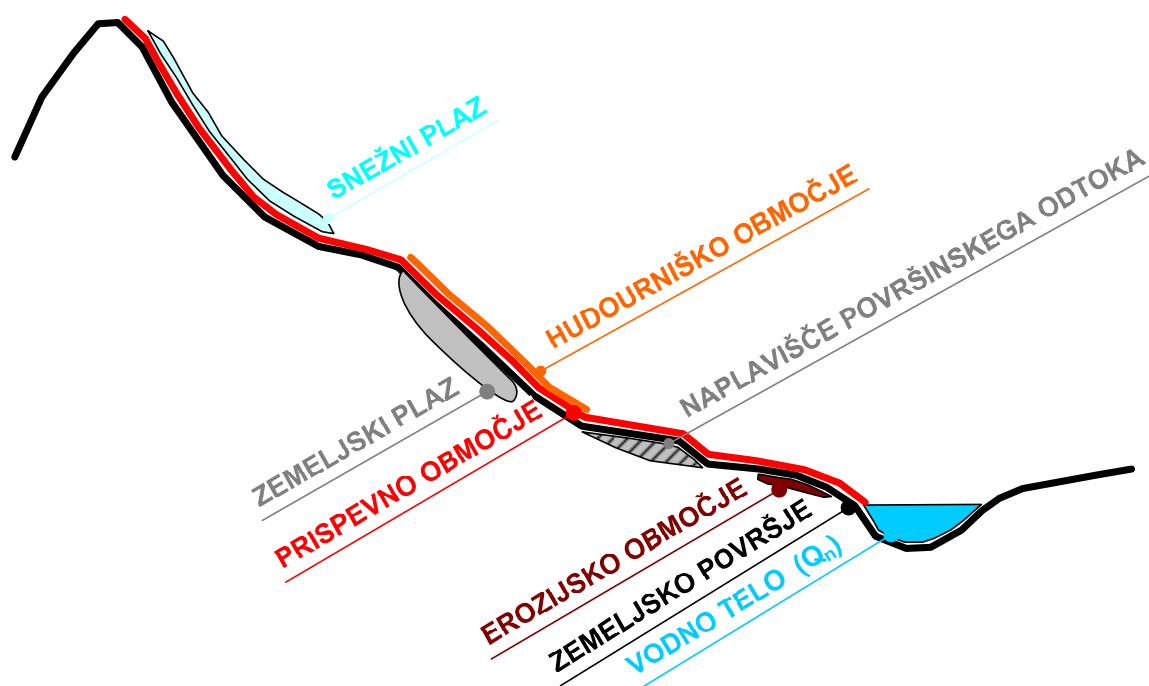
- vodno zemljišče (glede na pravila stroke ali pravni predpis),
- obala,
- priobalno zemljišče,
- poplavno zemljišče morja idr.

6.3.2.5 Razpršeni površinski odtok

Razpršen površinski odtok je odtok vode s površine zemlje, ki ne tvori toka vode v hidrografski mreži. Takšen tok po površini nima nekkaterih morfoloških sprememb, ki so značilne za površinske vode. Elemente razpršenega površinskega odtoka predstavljajo v prostoru naslednje entitete:

- prispevno območje, kot površina, po kateri teče razpršeni vodni tok,
- naplavišče površinskega odtoka,
- erozijsko območje,
- hudourniško območje,
- plaz (zemeljski plaz, snežni plazov), sprožen npr. zaradi zamakanja s temi vodami.

Prispevno območje (zlivno ali vodozbirno območje, del hidrografskega območja) so zemljišča (površine), s katerega razpršeni površinski odtok odteka v isto površinsko vodno telo (Horvat et al., 2001). Prispevno območje je v trirazsežnem prostoru predstavljeno kot (ukrivljena) ploskev, prilegajoča se zemeljskem površju (Slika 52). Z geometrijo ploskve je zagotovljeno, da lahko v vsaki njeni točki določimo smer toka vode in prispevno površino za to točko. Več prispevnih območij hudournikov, katerih prispevne površine so ogrožene ali napadene z erozijskimi procesi ali naplavišči, sestavlja *hudourniško območje*.



Slika 52: Prerez skozi elemente razpršenega površinskega odtoka.

Fig. 52: Section through catchment area elements.

Naplavišče površinskega odtoka so deli zemljišč, na katerih se zaradi zmanjšane transportne sposobnosti razpršenega površinskega odtoka odlagajo naplavine (Horvat et al., 2001). Naplavišča so posledica procesov, ki spreminjajo zemeljsko površje, zato so umeščeni pod zemeljsko površino oziroma je del ovoja (plašča) telesa soležen z zemeljskim površjem. Naplavišče je trirazsežen element, zato ga v trirazsežnem prostoru prikazujemo kot telo.

Erozijsko območje je površina, na kateri prihaja zaradi intenzivnega delovanja padavin in površinskih voda do izpiranja zemljišč (ZV-1, 2002), erozija pa je proces, ki spreminja zemeljsko površje. Ali je torej erozijsko območje določljivo v globino zemeljskega površja? Erozijsko območje je del zemeljskega površja, kjer nastajajo erozijski procesi v območju pedosfere⁵ (izjemoma pa lahko sega tudi v litosfero). Če želimo določevati erozijski potencial, moramo erozijsko območje obravnavati v trirazsežnem prostoru kot telo, ki leži pod zemeljskim površjem.

⁵ Pedosfera je zunanja plast Zemlje, ki jo predstavlja prst. Pripada procesu nastanka prsti. Obstaja kot nekakšen vmesnik med litosfero, atmosfero, hidrosfero in biosfero. (vir: Wikipedija)

Pláz je geološki pojav pri katerem se gmota snovi (zemljina, kamenina, ali sneg), ki se na strmem pobočju loči, odtrga od celote in zdrsne navzdol. Plaz je posledica fizikalnih in kemijskih sprememb, ki nastanejo zaradi različnih naravnih ali antropogenih dejavnikov, kot so potresi, vulkanske aktivnosti, erozija rek ali ledenikov, delovanje morskih valov, tresenje zemlje zaradi prometa, večjih strojnih del, večjih nenadnih prekomernih zbiranj vode, ki so posledica močnih padavin (dežja ali snega). Ti dejavniki vplivajo na spremembo ravnovesja sil. Posledica je, da nestabilne sestave zdrsijo v ugodnejši stabilen položaj. Zemeljski plazovi so v trirazsežnem prostoru obravnavani kot telo, ki leži pod zemeljskim površjem. Verjetnost nastanka snežnega plazu je pogojena z debelino snega nad zemeljskim površjem. Zato lahko obravnavamo snežne plazove v trirazsežnem prostoru kot telo, ki leži na zemeljskem površju.

Ugotovimo torej lahko, da so elementi razpršenega površinskega odtoka:

- prispevno območje,
- hudourniško območje,

v modelu vodnega sistema umeščenega v navidezno okolje predstavljeni kot ploskev na zemeljskem površju,

da pa so:

- naplavišče površinskega odtoka,
- erozijsko območje,
- plaz

v modelu vodnega sistema umeščenega v navidezno okolje predstavljeni kot telesa.

6.3.2.6 Sinteza elementov vodnih pojavov v modelu vodnih sistemov

V poglavjih 6.3.2.1 do 6.3.2.5 so prikazani elementi vodnih pojavov, kot sem jih definiral v trirazsežnem prostoru. Členitev po posameznih tipih vodnih pojavov je bila potrebna za ugotavljanje elementov posameznih vodnih pojavov, saj sem lahko s takšno metodo uspešno opredelil elemente glede na posamezne tipe vodnih pojavov.

Ugotovljeno je, da so ključni elementi vodnih pojavov, vodna telesa. Vsak tip vodnih pojavov vsebuje vodno telo, kar je tudi glavna entiteta v trirazsežnem prostoru, ki nas zanima. Razsežnost vodnega telesa pa vpliva na druge elemente prostora, neposredno ali posredno povezane z vodo. Vodno telo torej predstavlja pojavne oblike voda. Čeprav vodno telo ni nujno vedno v celoti zapolnjeno z vodo, pa se šteje, da je tam voda prevladujoč element.

Obstoječi standard DIN 2425 (1998) podaja standardiziran prikaz vodnih pojavov v kartah z informacijo umestitve v prostor. V trirazsežnem prostoru tovrstni prikazi ali standardizacija kartografskih znakov ni primerna, saj tretja razsežnost ni prikazana v polni meri. Vodni pojavi so lahko, zaradi svoje izrazite nepravilne geometrije, namreč težje geometrijsko in časovno predstavljeni in interpretirani samo s kartografskim znakom.

Zakon o vodah (2002) definira vodno telo kot del tipa vodnih pojavov⁶, ne določa pa v prostorskem smislu, kaj to vodno telo obsega. Direktiva o vodah (2000) definira pojme, ki so uporabljeni v direktivi in jih neposredno povezuje z (vodnim) telesom, ter jih povezuje in opredeljuje tudi kot sklop tehničnih parametrov, kot so npr. močno modificirano vodno telo, stanje vodnega telesa (npr. dobro stanje) in druge pomembne opredelitve za razvrščanje. Direktiva o vodah (2000) uporablja razvrstitve vodnih teles pretežno kot podlaga za upravno-administrativni nadzor in načrtovanje ukrepov v povodju in ne opredeljuje entitete v prostoru kot telo ali drug topološki element. Izdelan način zaznave vodnega telesa v trirazsežnem prostoru pa je skladen z nameni Direktive o vodah (2000) in Zakona o vodah (2002) ter v polni meri podpira način obravnave za potrebe zanesljivega ugotavljanja stanja voda in za primerjanje le-tega z okoljskimi cilji, ki so določeni s predpisi.

Dokazano je, da je osnovna entiteta vodnih pojavov prav vodno telo, ki pa se v prostoru in času spreminja. Vodna telesa se med seboj ne prekrivajo, so pa priležna in med seboj "komunicirajo" tako, da snovi oz. voda prehaja iz enega v drugega po fizikalnih zakonih. Vodno telo za potrebe umeščanja modelov vodnih sistemov v navidežno okolje zato definiram kot telo, ki je pretežno sestavljeno iz vode (npr. jezero, snežni plaz ipd.), ali kot telo, v katerem voda predstavlja gonilno silo procesov (npr. erozija, ipd.).

⁶ Vodno telo površinske vode je pomemben in razpoznaven del površinske vode. Vodno telo podzemne vode je pomemben in razpoznaven del podzemne vode znotraj enega ali več vodonosnikov.

Vodne pojave (razen razpršenega površinskega odtoka) lahko v modelih vodnih sistemov prikažemo z obveznimi telesi, ki ponazarjajo predmet obravnave, tj. vodo in neposredni geomorfološki vpliv vodnih teles na zemeljsko površje:

- vodno telo (tekoče vode, stoječe vode, podzemne vode, morje),
- naplavišče in erozijsko žarišče (tekoče vode, stoječe vode, morje).

Razpršen površinski dotok pa je prikazan s ploskvami, praviloma soležnimi z zemeljsko površino. S ploskvami pa je lahko povezan dodaten opis lastnosti obravnavanih procesov.

6.3.3 Vodni objekti

Vodni objekti so antropogeni posegi, s katerimi se zagotavlja načrtovana raven urejenosti vodnih zemljišč, zagotavlja varstvo pred škodljivim delovanjem voda in varstvo pred antropogenimi vplivi ter vpliva na dinamiko vodnih količin v času in prostoru. Vodni objekti so antropogeni elementi vodnih sistemov, ki jih lahko po funkciji delimo na (Horvat et al., 2001) (Slika 44):

- zgradbe za rabo voda,
- zgradbe za zaščito voda,
- zgradbe za varstvo pred vodami,
- zgradbe za časovno in prostorsko razporeditev voda in plavin,
- druge zgradbe,
- naprave,
- ureditve.

Osnovno razvrščanje vodnih objektov je opravljeno glede na primarno funkcijo, ki jo opravljajo v vodnem gospodarstvu. Ker imajo vsi vodni objekti, kot elementi vodnih sistemov, skupno značilnost, tj. da so grajeni, so njihove mere in razsežnosti v prostoru znane. Kaj je osnovna lastnost vodnih objektov kot elementov vodnih sistemov? So neposredno povezani z vodo, bodisi da predstavljajo eno od robnih ploskev vodnega telesa (pregrada v

stiku z vodo v akumulaciji) ali dajejo obliko vodi (npr. v napravah), ali pa samo vplivajo na z vodo povezane procese oz. na način obravnave aktivnosti povezanih z vodo (npr. v ureditvah). Vodni objekti tako:

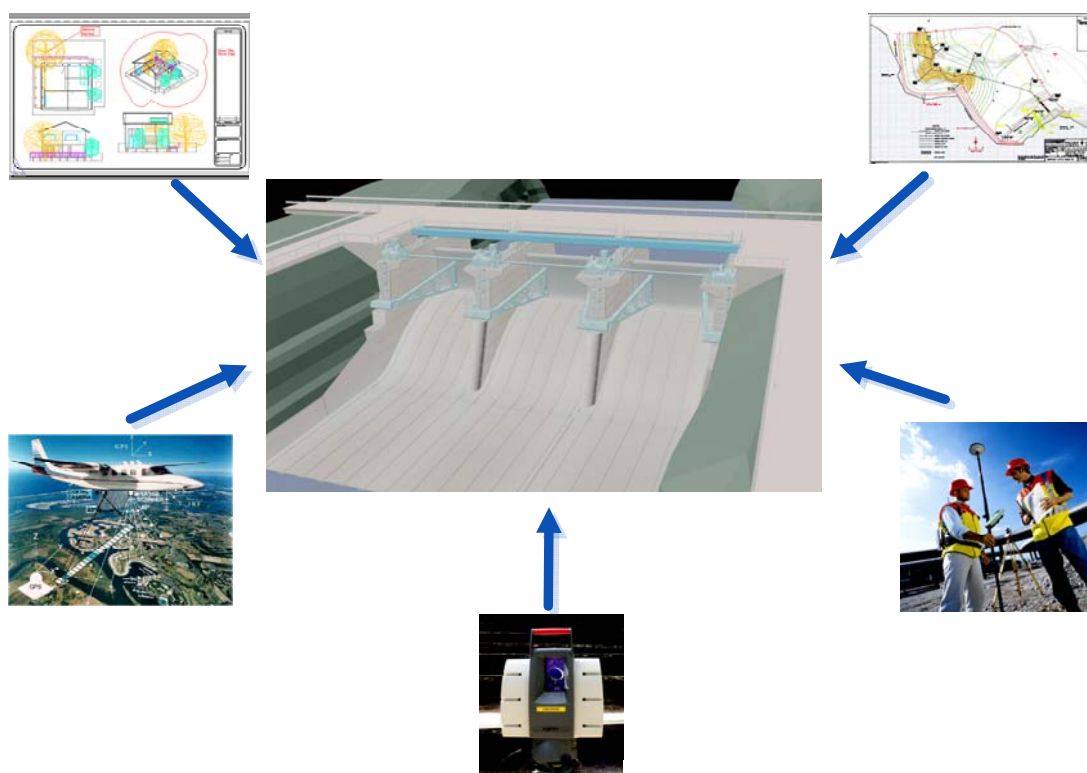
- povezujejo vodna telesa,
- določajo njihovo obliko ali pa
- neposredno vplivajo na (fizikalne, kemijske idr.) lastnosti vode v vodnih telesih in tudi na vodo v zgradbah, napravah in ureditvah.

Upodabljanje vodnih objektov sproža vprašanje, kakšna pa naj bi bila ustrezna predstavitev zgradbe kot objekta v navideznem okolju (glej poglavje 5.4). Zgradba, naprava ali ureditev je namreč lahko v navideznem okolju upodobljena z različnimi tehnologijami zajema in prikaza podatkov, npr. (Slika 53):

- s trirazsežnim modeliranjem na podlagi načrtov, izdelanih v CAD sistemu;
- s prenosom v CAD sistemu izdelanega podrobnega modela trirazsežnega objekta v navidežno okolje, pri čemer je prenos odvisen od uporabljene tehnologije za upodobitev v navideznem okolju;
- z zajemom robov zgradb in naprav s klasičnim ali GPS merjenjem robnih točk zgradbe in točk v zgradbi, kjer posamezni deli zgradbe ali naprave določajo obliko vodi (vodnemu telesu);
- z zajemom ploskev zgradbe s tehnologijo oddaljenega zaznavanja, npr. LIDAR, 3R lasersko skeniranje,
- zajem gabaritov in višin iz stereo posnetkov ipd.,

kar neposredno določa tudi nivo detajlov in generalizacije predstavitve geometrije.

Z novejšimi tehnikami daljinskega zaznavanja, npr. lasersko skeniranje objektov, ne moremo neposredno zgraditi konsistentnega topološkega modela objekta, saj meritve podajo le zunanje vidne ploskve. Z dodatno obdelavo lahko s posameznimi deli ploskev opišemo lupino objekta, kljub temu pa ostaja še vprašanje, kako zagotoviti prepoznavnost teh objektov oz. kako prikazati, da gre za z vodo funkcionalno povezane zgradbe, naprave in ureditve.



Slika 53: Tehnologije zajema podatkov o vodnih objektih.

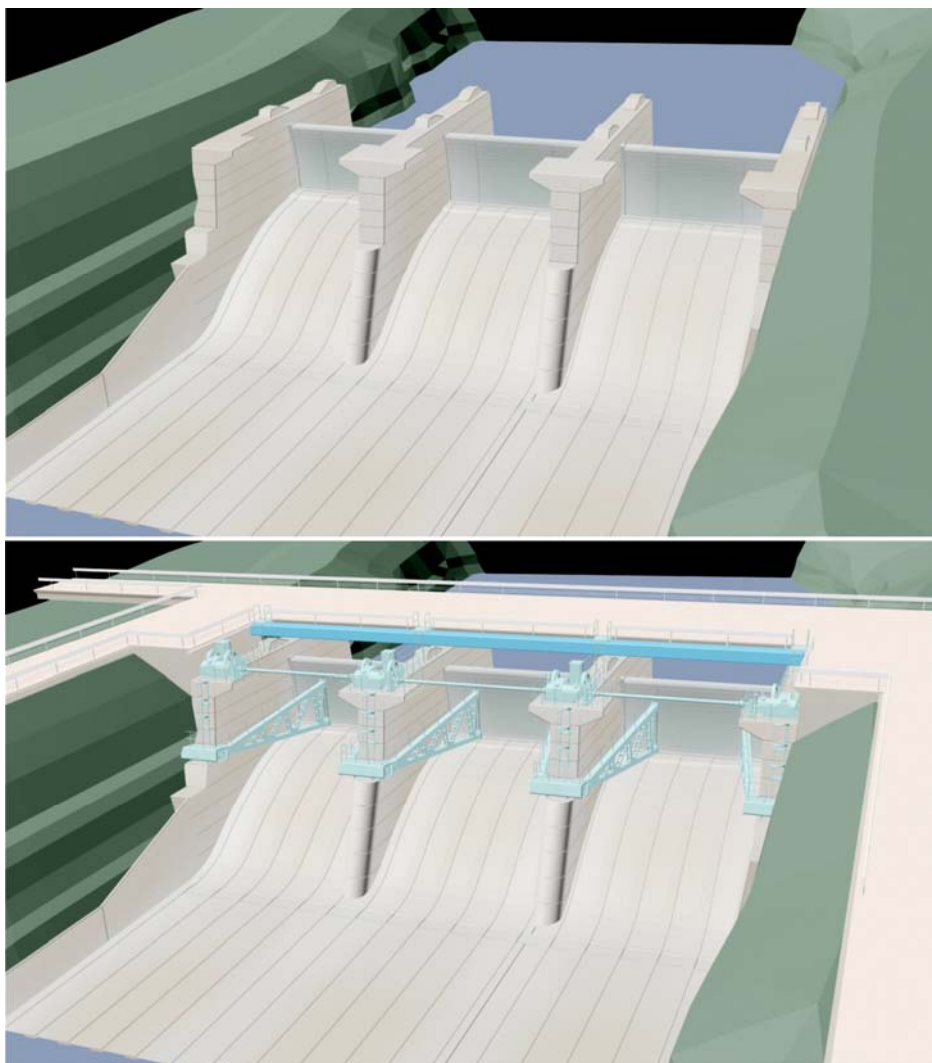
Fig. 53: Water structures data gathering.

Glede na stopnjo informativnosti zajetih geometrijskih podatkov je možno izdelati model objekta v trirazsežnem prostoru in tudi uporabiti različne posebnosti upodabljanja površin objekta, npr. texture. Smatram, da so osnovni elementi (tj. minimalni) vodnih objektov, ki morajo biti prikazani kot objekti v navideznem okolju, naslednji:

- zunanji obod zgradbe, naprave in ureditve,
- deli zgradb in naprav, ki določajo obliko vode ali posegajo v vodno telo ali pa predstavljajo hidravlične elemente zgradb, npr. zapornice.

Slika 54, zgoraj (vir modela: Dosh 3D), prikazuje na primeru rečne pregrade osnovne elemente pregrade, ki imajo natančno določljivo geometrijo:

- prelivna polja,
- ločilni zidovi prelivnih polj,
- podslapje,
- zapornice, ki pa so hidravlično vodena naprava, zato predstavljajo gibljiv element.



Slika 54: Osnovni in dodatni elementi modela rečne pregrade.

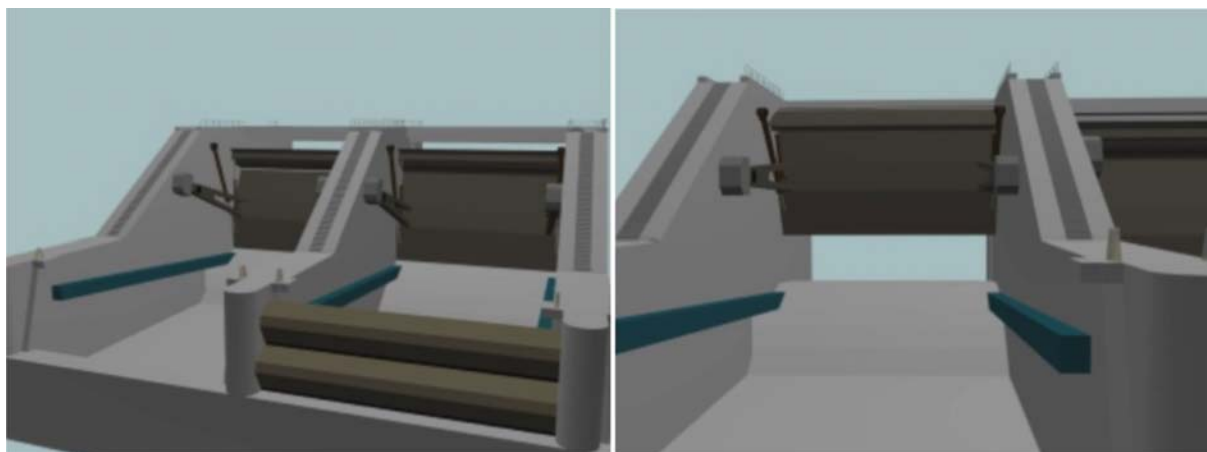
Fig. 54: Significant and supplementary elements of river barrage.

Zapornice, ki so naprava, s katero se regulira višino vode v akumulaciji, so v ustreznem obsegu del plašča vodnega telesa in zato določajo obliko vodnega telesa. Obstajajo pa seveda še dodatni elementi vodnih objektov, ki dopolnjujejo osnovne geometrijske podatke in lahko dopolnjujejo vizualno predstavo in semantično opredelitev, ne vplivajo pa na obliko vodnega telesa neposredno. V primeru rečne pregrade dodatni elementi (Slika 54, spodaj) objekta prikazujejo:

- hidravlične naprave za delovanje zapornic,
- jekleno konstrukcijo (ali mostni žerjav) za dvig in spust zapornic,

- jaške za različne vode, npr. električne, hidravlične ipd.,
- mostno konstrukcijo, ki nalega na ločilne zidove prelivnih polj,
- ograje na mostni konstrukciji in
- razne druge (arhitekturne) elemente.

Z zunanjim obodom (plašča) objekta, naprave ali ureditve dopolnjujemo celovitost predstavitve vodnega telesa in njegove okolice, z drugimi deli zgradb, naprav in ureditev pa dopolnjujemo vizualni učinek, prikazujemo oz. povezujemo primarno funkcijo zgradbe s sekundarno funkcijo, npr. prometnico preko pregrade, s primerno programsko opremo pa lahko v model vključimo tudi gibanje, ko npr. prikazujemo delovanje zaporničnih elementov (Slika 55, vir modela: UL, FGG-KMTe). Takšna simulacija delovanja naprave predstavlja v navidezno okolje vključen čas (glej tudi poglavje 7.3 in Prilogo B), kar dopolnjuje geometrijski opis.



Slika 55: Simulacija delovanja zaporničnih elementov HE Vrhovo
(levo: zaprte zapornice, desno: odprte zapornice).

Fig. 55: Barrier operation simulation at HPP Vrhovo
(left: barrier closed, right: barrier open).

Modeli objektov v navideznem okolju naj ponazarjajo naslednje lastnosti vodnih zgradb, naprav in ureditev:

- upodabljajo grajene objekte z znano geometrijo in umeščajo upodobitev v okolico,

- predstavljajo robne pogoje (geometrijo) za vodno telo ali tok vode v zgradbi in napravi,
- vplivajo na časovni razvoj vodnega telesa (npr. odprtost ali zaprtost zapornic),
- povezujejo modele vodnih teles v model vodnega sistema,
- posredno, z vplivom na vodna telesa, naj vplivajo na druge rabe prostora oz. se z njimi prepletajo.

Med vodne objekte se uvrščajo tudi zgradbe, ki ne določajo oblike vodnih teles, ki pa:

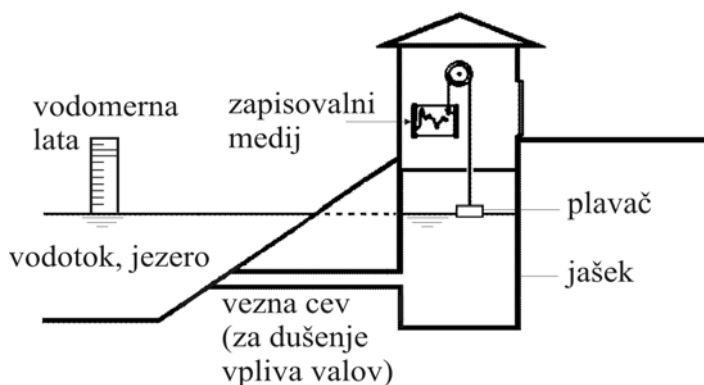
- a) vplivajo na vodne pojave razpršenega površinskega odtoka, npr. protilavinski objekt (snežni plazovi), lovilni objekt (padajoče kamenje), galerija (snežni plazovi in padajoče kamenje);
- b) so potrebne zaradi procesov, pri katerih je voda sprožilo, kot npr. objekti za zavarovanje pogojno stabilnih površin;
- c) objekti, ki sicer določajo ali vplivajo na obliko vodnega telesa, a primarna raba ni vodnogospodarska raba, npr. prepusti, prečkanja (mostovi, viadukti) ipd.

Vse navedene zgradbe se v modelu vodnih objektov prikazujejo z dejansko geometrijo svojih teles.

V podobne objekte lahko uvrščamo tudi vodne naprave, ki v vodno telo ne posegajo, a predstavljajo pomemben del vodnih objektov, kot so npr. merilne naprave površinskih in podzemnih voda, kjer se meritve izvajajo z daljinskim zaznavanjem nivoja, ipd. Tovrstne naprave se lahko prikazujejo s 3R znakom, saj običajno ne obstaja potreba po natančnem prikazu geometrije naprave, vendar pa umestitev tovrstnih naprav v navidezno okolje predstavlja ključen podatek o lokaciji zajema podatkov o vodnem telesu, ki omogoča relacijo/asociacijo z nizi časovno odvisnih podatkov o lastnostih vodnega telesa. Običajne vodomerne postaje, ki so povezane z vodnim telesom pogosto le z vezno cevjo (Slika 56), ki vodi do vodnjaka z limnigrafom, lahko prikažemo tako z znakom, kot z vsemi detajli, če le poznamo mere grajenega objekta.

Vodne ureditve lahko predstavljamo v prostoru kot posamezne grajene elemente, npr. ureditve za zavarovanje površin, ipd. ali množico zgradb, naprav in ureditev, ki skupaj tvorijo

funkcionalno celoto, katere posamezni elementi niso izdelani v skladu s standardi, npr. soline. Ureditve za zavarovanje površin lahko v trirazsežnem prostoru prikažemo s telesom ali z ukrivljeno ploskvijo, npr. popleti, fašinske zložbe. Nekaterih drugih ureditev, ki so praviloma zgolj poseg v prostor, npr. košnja trave, čiščenje zarasti, odstranjevanje dreves in štorov, sejanje površin, ozelenitev površin z biotorkretom, oblaganje brežin s travnato rušo, pa ni potrebno prikazovati s telesom. Ureditev običajno predstavlja večje planimetrične površine, razpoznavne višine pa ni oz. je (npr. drevesa) le točkovno zaznana, kar je mogoče predstaviti z ustrezno teksturo. Množice zgradb, naprav in ureditev, ki skupaj tvorijo vodni sistem, ni mogoče prikazovati kot enovito telo v trirazsežnem prostoru. Ustreznejšo združevanje objektov navideznega okolja je mogoče opraviti na nivoju opisnega (atributnega) dela objektov ali pa z gradnjo modela vodnega sistema kot drevesne strukture, kar že omogoča programska oprema za realistično upodabljanje (npr. Autodesk 3Ds, VIZ, Maya ipd.).



Slika 56: Shematski prikaz vodomerne postaje.

Fig. 56: Schematic representation of gauging station.

Pravni režimi so pravna pravila, s katerimi predpis s področja upravnega prava določa način uživanja dodeljene posebne pravice in obveznosti na določenem območju, kadar za to obstaja podlaga v zakonu in so podani kriteriji, pod katerimi se pravni režim nedvoumno lahko določi, saj lahko pravni režim poseže tudi v lastninske pravice oseb zasebnega prava (ob ustrezni odškodnini). Torej gre za enoznačno določljivo območje, za katerega predpis vsebuje obseg pravic, dolžnosti in omejitev, ne samo za lastnika ali upravljavca zemljišča, ampak tudi za naključnega uporabnika. Podatki o pravnem režimu zemljišč naj bi se vpisovali kot breme

na nepremičnini na podlagi zakona, prostorskega plana ali izvedbenega akta oziroma drugega akta, ki določa pravni režim zemljišč. (Gosar, 2000)

Pravni režimi so navadno vezani na državni koordinatni sistem oz. na zemljiški kataster. Pravni režimi, ki morajo biti v prostoru določeni na parcelno mejo natančno, pa ne naslavljajo samo površine na zemeljskem površju oz. vodne gladine. Glede na našo pravno ureditev lastnik parcele ni tudi neomejen lastnik od litosfere do troposfere, tj. nad in pod parcelo, kot je to primer v nekaterih državah ZDA, kjer sega lastništvo "od pekla do nebes". Razmere pri nas lahko ilustriramo z uveljavljenimi pravnimi režimi v/na vodnem telesu z mejami območja marikulture. Pravni režim le-tega sega nekaj metrov nad gladino morja, v globino pa do (v primeru morja R Slovenije) dna morja. Zato smatram, da naj bodo tudi pravni režimi v trirazsežnem prostoru predstavljeni kot telesa (glej tudi poglavje 7.1).

7 PRIKAZ UPORABE MODELOV VODNIH SISTEMOV V NAVIDEZNEM OKOLJU

V poglavju 6.3.2 in 6.3.2. je bila prikazana analiza elementov vodnih sistemov v trirazsežnem prostoru, nato pa izdelan konceptualni model vodnih sistemov, ki prikazuje načela umeščanja modelov vodnih sistemov v navidezno okolje. Navidezno okolje je definirano kot univerzalno trirazsežno grafično okolje, ki je matematično opisno določeno in lahko vsebuje tudi časovno komponento (t.i. četrto razsežnost). Izdelano z orodji informacijske tehnologije prikazuje trirazsežen, (visoko) realističen prikaz zemeljskega površja z umeščenimi naravnimi (vodnimi) pojavi in grajenimi objekti. V definiranju navideznega okolja kot univerzalnega trirazsežnega okolja smo se hoteli ograditi od navezave na programsko opremo, ki omogoča izdelavo navideznega okolja. V raziskovanju tehnologij izdelave navideznega okolja pa smo se omejili pretežno na GIS orodja, ki omogočajo tudi modeliranje trirazsežnega okolja. Kot je v nadaljevanju prikazano, druga orodja, (npr. 3R CAD), (še) ne omogočajo izdelave navideznega okolja, ki bi omogočalo: (i) hkrati visoko realističen prikaz in (ii) (časovno) učinkovito izdelavo trirazsežnih modelov ter (iii) bilo povezljivo z atributnimi bazami podatkov. Vendar pa ne smemo zanemariti dejstva, da je v zadnjih letih potekal intenzivni razvoj tovrstne programske opreme, ki je dosegla visoko stopnjo realizacije, kot so npr. raziskave na področju 3R GIS, realistične upodobitve za filmsko industrijo, orodja za interakcijo v navideznih okoljih, popularizacija uporabe navideznih svetov (npr. Second Life) ipd. Zato pričakujemo, da so tovrstni pristopi umeščanja vodnih sistemov v navidezna okolja aktualni že sedaj.

V mojem modeliranju poudarek ni bil na operativni izvedbi, tj. na izdelavi celotnih ali zaključenih sistemov ali podsistemov, saj je za tovrstno delo potrebno timsko delo in kakovostna (in draga) strojna in programska oprema. Zato so kot dokazilo o uporabnosti modelov vodnih sistemov v navideznem okolju uporabljeni le deli vodnih sistemov in posamezni objekti.

Za vse elemente modelov vodnih sistemov, prikazane v prejšnjih poglavjih, in za prikaz uporabe objektov modelov vodnih sistemov v tem poglavju je bila uporabljena naslednja

programska oprema: ESRI ArcINFO z razširitvijo ESRI 3D Analyst, Autodesk VIZ in Alias (Autodesk) Maya. V primeru uporabe programske opreme ESRI je bila uporabljena tudi prostorska podatkovna baza ESRI Spatial Database Engine (SDE) na Microsoft SQL Server 2005 podatkovni bazi, potrebna predvsem za upravljanje večjih količin podatkovnih nizov. Z navedeno programsko opremo je uporabljena tudi raznovrstna dodatna programska oprema, ki povečuje funkcionalnost operacij in upravljanje s prostorskimi podatki, ki je bila prosto dosegljiva na svetovnem spletu.

V nadaljevanju so prikazani primeri umeščanja modelov vodnih sistemov v navidezno okolje za naslednje primere:

- upodobitev rabe morja in pravnih režimov morja Republike Slovenije,
- interakcija med izmerjenimi in modeliranimi podatki gladine reke Save v Krškem, umeščene v navidezno okolje, in
- prikaz simulacije obratovanja zaporničnih elementov na prelivnem polju HE Vrhovo.

Čeprav se vsi primeri uporabe modelov vodnih sistemov v navideznem okolju nahajajo na območju R Slovenije, smatram da je testiran konceptualni model prenosljiv tudi za obravnavo druge v svetu. Vsi trije primeri so namreč tipični za področje voda, saj pokrivajo pravne vsebine, hidravlično modeliranje in razmere pri obratovanju HE.

7.1 Upodobitev modelov vodnih sistemov v navideznem okolju

Upodobitev je prikaz realne ali abstraktne količine z namenom, da zaznamo obravnavano količino ali pa preučujemo vpliv količine na okolico. Raba voda, v primeru podeljene pravice rabe (vodne pravice) na delu vodnega telesa, se nanaša na točno določeno območje ali na del vodnega telesa. Na vodnih telesih praviloma nista vzpostavljena takšna kataster in parcelacija kot na kopnih delih zemeljskega površja. Za Slovensko morje je bila šele pred nekaj leti določena katastrska občina Morje in ena sama pripadajoča parcela. Opisovanje posameznih pravnih režimov na vodni površini morja je zato določeno s (dvorazsežnimi) koordinatami državnega koordinatnega sistema oglišč območja. Za razliko od vzpostavljenega katastra na drugih delih območja R Slovenije, kjer je možno pravice in omejitve rabe zemljišč določevati

po parcelnih mejah, je določevanje pravic in omejitev rabe morja povezano s površinami na morski gladini, vendar so, kot bo prikazano v nadaljevanju, pravni režimi izrazito trirazsežni.

Raba morja R Slovenije in pripadajoče pravice in omejitve, ki jih prinašajo t.i. pravni režimi, predstavljajo abstraktni pojav na vodi, saj na morski gladini v realnem svetu ni opaziti meje pravnega režima. Pravni režimi pa so v svojih prepovedih, omejitvah in zapovedih izrazito trirazsežni in zaradi same narave abstraktnosti zahtevajo tudi ponazoritev v navideznem okolju, ki predstavlja zelo naravno okolje za upodobitev pravnih vsebin, s tem pa tudi podatkov, ki so lahko vključeni v modele okolja, v katerem se nahajajo.

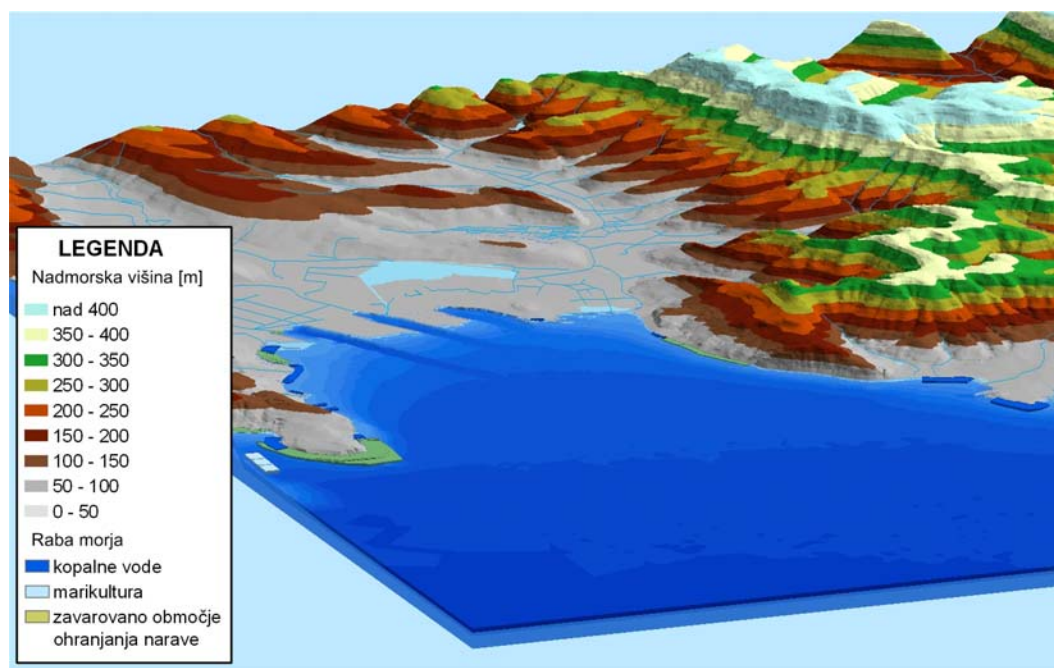
Za upodobitev rabe morja in pripadajočih pravnih režimov je bila uporabljena GIS programska oprema ESRI ArcINFO z razširitvijo 3D Analyst verzije 9.2. Programska oprema ne omogoča popolnega 3R modeliranja prostorskih objektov, temveč le t.i. 2,5R. Zato so objekti navideznega okolja izdelani z metodologijo, ki jo omogoča razpoložljiva programska oprema, tj. z modeliranjem ploskev. Uporabljeni so naslednji podatki:

- za izdelavo modela zemeljskega površja:
 - o kopni del: GKB25 plastnice (GURS),
 - o morski del: podatki o batimetriji (MP),
- za prikaz hidrografske mreže: GKB25 hidrografija (GURS),
- podatki o rabi morja (Gosar, 2000).

Model zemeljskega površja (Slika 57) je izdelan s ploskvijo, kot digitalni model terena z mrežo neenakih trikotnikov (TIN). Prikaz kopenskih in morskih voda je izdelan tako, da je na zemeljsko površje, kot nanosni sloj, dodana hidrografska mreža. Gladina morja je prikazana kot ravna horizontalna ploskev z absolutno nadmorsko višino 0 m. Tovrsten prikaz gladine ne ponazarja celotnih dinamičnih lastnosti morja (bibavice, valovanja), saj v izbranem orodju ni mogoče modelirati časovno odvisnih trirazsežnih objektov. Seveda pa zasnova modela prikazuje osnovne lastnosti opazovane rabe morja, tj. opis stanja oz. informacij o tem, kaj je nad in kaj pod gladino morja.

Raba morja je na kartah in v GIS sistemu prikazana s površino, v 3R GIS pa kot ploskev, ki nalega na zemeljsko površje (dno morja) ali na vodno gladino na izbrani višini, npr. 0 m.n.m.

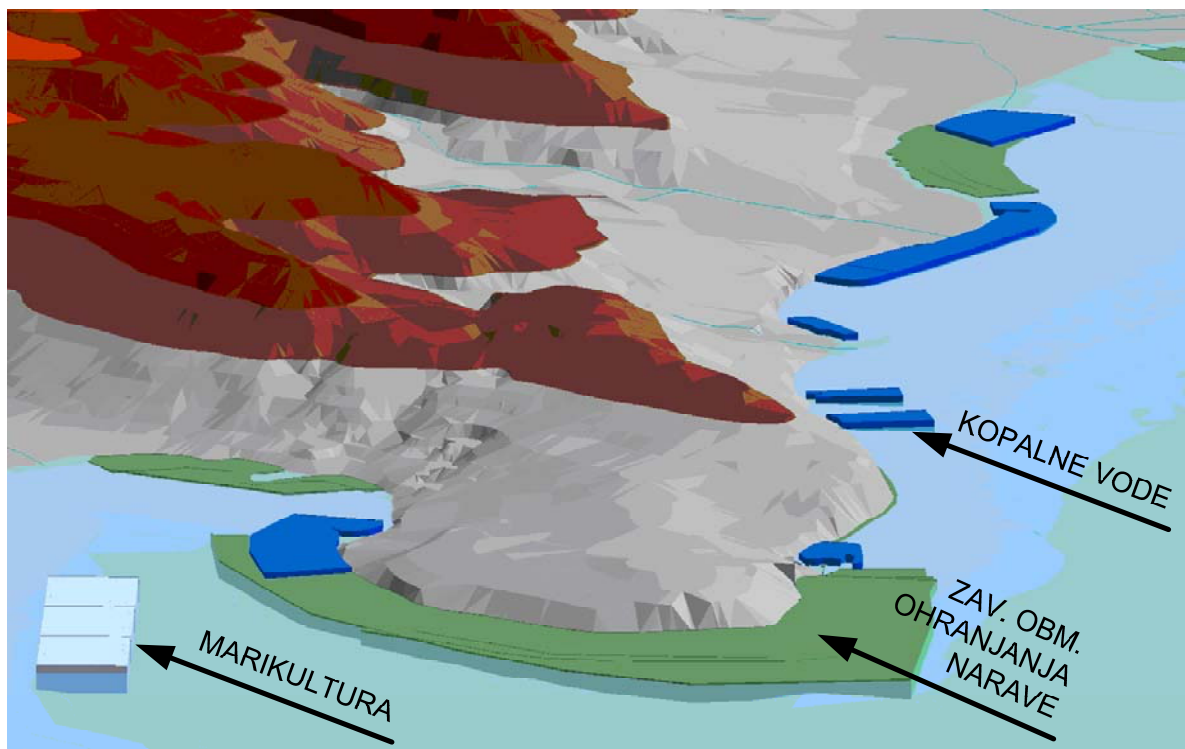
(Gosar, 2000). V poglavju 6.3.3. je obrazloženo, zakaj bo potrebno za interpretacijo rabe vodnih teles, npr. morja, uporabljati trirazsežno upodobitev. Pravni režimi, ki so ploskovno določeni s koordinatami državnega koordinatnega sistema, predstavljajo izrazito trirazsežen element pravic in obveznosti v prostoru (tj. do določene globine oz. višine na gladino), pa naj bo to v realnem svetu ali v navideznem okolju.



Slika 57: Raba morja v Koprskem zalivu na primeru marikulture, kopalnih voda in zavarovanih območij ohranjanja narave.

Fig. 57: Marine area uses in Koper bay in the case of shellfish sites, bathing waters and nature preservation areas.

Podeljene vodne pravice na delih morja, na primer za marikulturo, v pravnem aktu ne določajo pravic in obveznosti koncesionarjem v globino morja in nad gladino morja. Šteje se namreč, da koncesionarju pripada tisti del vodnega in zračnega prostora, ki mu je potreben za opravljanje podeljene pravice. Podeljene pravice gojenja školjk navadno ne potrebujejo za svojo dejavnost velike višine, saj so školjčišča privezana na plavajoče naprave (plovce), ki so povezane med seboj v polju in sidrane na morsko dno. Zato nad gladino v našem plitvem morju, podeljene pravice rabe morja segajo od morskega dna pa do višine nekaj metrov. Za prikaz svojega primera sem izbral 4 m.n.m. (Slika 58).



Slika 58: Raba morja ob Debelem rtiču.

Fig. 58: Marine area uses near Debeli rtič.

Tudi zavarovana območja ohranjanja narave so območja s pravnim režimom, ki so določena s prikazom na kartah s pomočjo obodnih parcel. Vsako zavarovano območje ohranjanja narave je s pravnim aktom opredeljeno, opredeljen pa je tudi način dovoljene, omejene ali prepovedane rabe. Na vodnih telesih določanje meje zavarovanega območja s parcelami ni več mogoče dovolj natančno, zato so na vodnih površinah meje območja prikazane s koordinatami v državnem koordinatnem sistemu. Z določenimi zapovedmi rabe (dovoljene ali prepovedane) pa so lahko določene tudi razsežnosti zavarovanega območja v tretji razsežnosti. Navadno zavarovano območje ohranjanja narave na/v morju obsega zemeljsko površje (dno morja), vodno telo nad dnom in tudi del ozračja nad morjem. V modelu so zavarovana območja ohranjanja narave prikazana kot telesa z razsežnostjo od zemeljskega površja pa do višine 2 m.n.m.. S tem smatram, da je omogočena gradnja začasnih objektov, npr. razglednih ploščadi iz obale, ter omogočeno uživanje v naravnih vrednotah.

Območje kopalnih voda obsega območje, na katerem se nahaja kopalna voda in je skladno s predpisi o varstvu pred utopitvijo naravno kopališče, ali pa se na njem običajno kopa večje število ljudi in kopanje ni prepovedano (Zakon o vodah, 2002). Razsežnost kopalnih voda je na morski gladini podana: (i) z od upravljavca določenim območjem (označbo kopališča) ali (ii) s prostorom do maksimalne oddaljenosti 150 m od obale. Kopalne vode se lahko, zaradi plitvega morja, umeščajo v navidežno okolje kot telo, ki sega od zemeljskega površja (dna morja) do višine 4 m.n.m. (ali več), saj je s tem možna postavitev začasnih plavajočih objektov in naprav pa tudi sidranje le-teh na dno morja.

Kljub temu, da je uporabljena tehnologijo upodabljanja, t.i. 2,5R prikaz, v navideznem okolju obravnavana raba morja prikazuje, da je raba vodnih teles trirazsežna, in da je za opredeljeno rabo potreben prikaz s telesi. Tako predstavljena raba morja v navideznem okolju povečuje predstavnost, pogloblja razumljivost in omogoča nadaljnje iskanje povezanosti oz. prepletenosti z drugimi rabami morja. Prostorski prikaz omogoča tudi preverjanje ustreznosti podeljenih vodnih pravic v/na vodnih telesih, saj upodabljanje entitet trirazsežnega prostora dopolnjuje predstavnost sicer nevidnih mej v realnem prostoru.

Prikazan pristop je prenosljiv in veljaven tudi za umeščanje rabe voda in pravnih režimov v druge modele vodnih teles.

7.2 Ugotavljanje skladnosti med izmerjenimi in modeliranimi podatki v navideznem okolju

V primerih umerjanja hidravličnih modelov je eno zahtevnejših opravil tudi ugotavljanje skladnosti (oz. doseganja še sprejemljivega oz. zadovoljivega odstopanja) med izmerjenimi in modeliranimi podatki. Zato bomo v navideznem okolju prikazali hidravlično modeliranje odseka reke Save, od lokacije načrtovane HE Krško do jezua Nuklearne elektrarne Krško. V navidežno okolje pa je umeščen del vodnega sistema, tj. vodno telo v okolici mostu (oz. njegovih stebrov) čez reko Savo, ki povezuje Videm s Krškim.

Uporabljena je GIS programska oprema ESRI ArcINFO z razširitvijo 3D Analyst verzije 9.2. Programska oprema ne omogoča popolnega 3R modeliranja prostorskih objektov, temveč le t.i. 2,5R, zato so objekti navideznega okolja izdelani z metodologijo, ki jo omogoča programska oprema, tj. z modeliranjem ploskev. Uporabljeni so naslednji podatki:

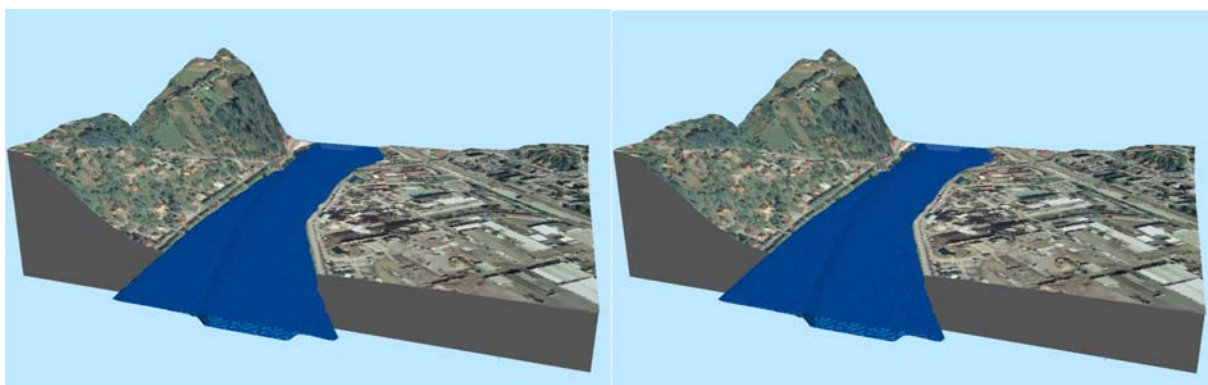
- za izdelavo modela zemeljskega površja:
 - o kopni del: LIDAR,
 - o vodni del: merjeni prečni profili rečne struge,
- rezultati matematičnega 1R hidravličnega modela HEC-RAS z razširitvijo HEC-GeoRAS.

Meritve območja spodnje Save so bile izvedene 14. in 16. januarja 2007. Ker je bilo v predhodnem času izredno malo padavin, so bili pretoki reke Save izredno nizki in so znašali okoli 100 m³/s. V času meritev je bila dosežena natančnost izmere 2-3 centimetre. Na podlagi te napake je bila ocenjena celotna napaka meritev med 3 in 4 centimetri. Zaradi povezave sistema z GPS enotami so bile vse meritve izvedene v koordinatnem sistemu WGS 84 in kasneje transformirane v državni koordinatni sistem s 7-parametrično Bursa Wolf transformacijo. Transformacija višin je izvedena na podlagi geoida Slovenije. V času LIDAR snemanja je bila zarast gola, torej brez listja. To je ugodno vplivalo na natančnost meritev, saj potrebujemo le podatke o zemeljskem površju. Gosta vegetacija namreč lahko povzroči, da se laserski žarek odbije, še preden doseže tla, in na ta način dobimo previsoko koto terena v primerjavi z resnično. Visoki vodostaji lahko, še posebno, če je takrat tudi velika kalnost vode, povzročijo, da se žarek razprši in tako ne dobimo odbitega signala od vodne površine. Tako za območja, kjer je voda pregloboka, da bi lahko žarek prodrl skozi vodo do rečnega dna, ne dobimo podatkov in moramo za takšna območja podatke dopolniti z drugačnim načinom izmere.

Na podlagi tako združenih podatkov (LIDAR + merjeni podatki o prečnih profilih) je izdelan model zemeljskega površja širšega obvodnega območja ter ekstrakcija geometrijskih podatkov o strugi in poplavnih območjih za vnos v 1R hidravlični model HEC-RAS. Priprava geometrije rečne struge in poplavnih območij za 1R hidravlični model HEC-RAS je izvedena s programsko razširitvijo HEC-GeoRAS. Le-ta omogoča pripravo geometrije na podlagi izdelanega modela zemeljskega površja z LIDAR podatki, ki je bistveno bolj natančna od

geometrije, pripravljene z vnosom točk na terenu izmerjenih prečnih profilov. To še posebej velja za poplavna območja, ki običajno niso zajeta s prečnimi profili, pa se je zajem obvodnih površin doslej izvedel s pomočjo plastnic kart (npr. TTN5). S pomočjo omenjene tehnike se lahko tudi pripravi geometrijo za tok po poplavnih območjih, kar omogoča zajeti 2R dinamiko toka z uporabo vejičastega rečnega sistema (t.i. kvazi 2R hidravlični model).

Za upodabljanje vodnih teles je uporabljena izračunana gladina pretokov z verjetnostjo nastopa 100 in 500 let (Q_{100} in Q_{500}) (Slika 59, pogled gorvodno). Vodno telo je sestavljeno iz ploskev: (i) modela zemeljskega površja, na katerega se projicira gladina in (ii) modela gladine, izračunane z matematičnim hidravličnim modelom. Zaradi boljše predstavitve je prikazan le del modeliranega odseka ob mestu Krško, vodno telo pa je "izvlečeno" iz modela zemeljskega površja. Kljub večji razliki v povratni dobi (in pretočnim količinam $Q_{100}=3290 \text{ m}^3/\text{s}$ in $Q_{500}=3950 \text{ m}^3/\text{s}$) ni opaziti večje razlike med modeloma vodnih teles, čeprav je pri pretoku Q_{500} gladina v povprečju 60 cm višja. Ta razlika je vidna v širši razsežnosti vodnega telesa v gorvodnem delu.

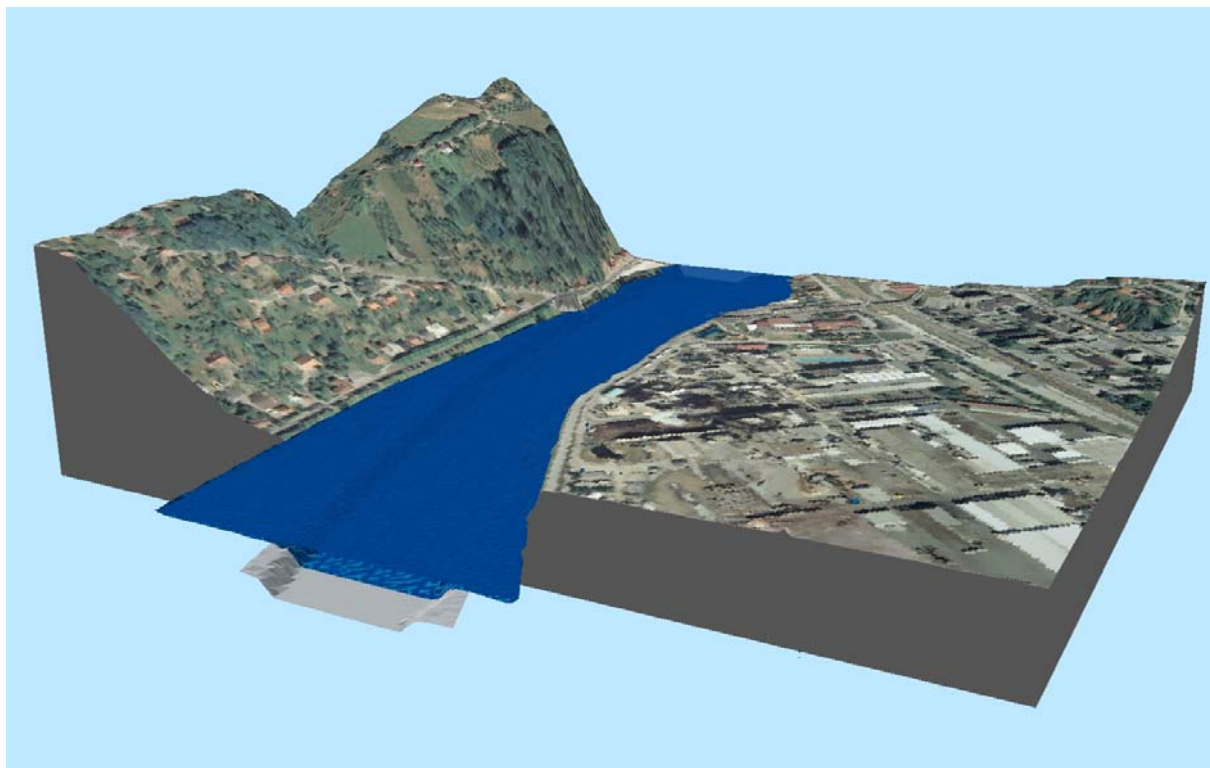


Slika 59: Model vodnega telesa pri pretoku Q_{100} (levo) in Q_{500} (desno).

Fig. 59: Water body model for Q_{100} (left) and Q_{500} (right) discharges.

Na podlagi izdelanega modela zemeljskega površja lahko določimo vodno zemljišče (glej poglavje 6.3.2.1.) (Slika 60, pogled gorvodno). Vodno zemljišče neposredno ni povezano z razsežnostmi vodnega telesa (npr. s pretokom določene povratne dobe), posredno pa, saj geomorfološki prelom nastane z vplivi vodnega telesa na zemeljsko površje. Zaradi lažjega prikaza upodobitve vodnega zemljišča je le-to prikazano kot podaljšek modela vodnega telesa

in modela zemeljskega površja (Slika 60, vodno telo-telo modre barve, vodno zemljišče-ploskev sive barve). Vidi se, da je obseg vodnega zemljišča manjši od širine vodnega telesa.



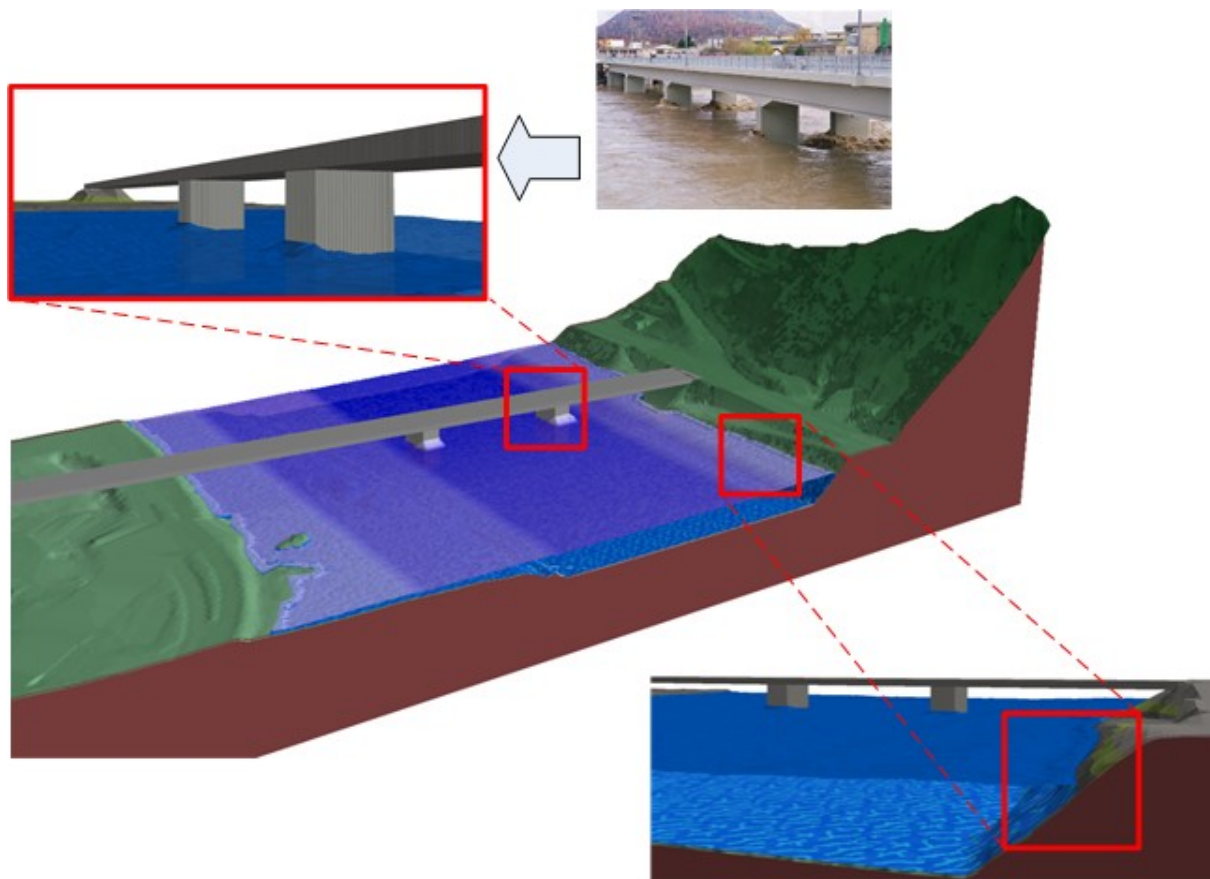
Slika 60: Model vodnega telesa pri pretoku Q_{100} in model vodnega zemljišča, kot izpeljanega elementa.

Fig. 60: Water body model for Q_{100} and water plot model as take out element.

Matematični hidravlični model predstavlja z enačbami opisani vodni sistem realnega sveta, zato je treba vrednosti izračunanih parametrov umeriti glede na dejansko dogajanje v vodnem sistemu. V nasprotnem primeru je uporabnost rezultatov hidravličnega modela omejena le na učne postopke oz. na fenomenološko analizo obnašanja vodnega sistema pri različnih stanjih toka vode. Za umerjanje matematičnega hidravličnega modela so bili uporabljeni podatki, merjeni ob visokovodnih dogodkih leta 1990 in 1998. Izmerjene vrednosti gladin v merilnih točkah so opisane s koordinatami v prostoru. Zabeležene lokalne razmere izkazujejo izmerjeno gladino, vendar pa ni znano, kakšen je kinetični člen vode v izmerjenih točkah oz. kakšna je višina izmerjene gladine glede na energijo vode v prerezu. Na primer, izmerjena gladina neposredno ob brežini (Slika 61, spodaj) je enaka energijski višini, saj je hitrost vode v teh točkah enaka nič. Na modelu vodnega telesa je le težka opaziti te razlike, saj so

razsežnosti vodnega telesa v prečni in vzdolžni smeri bistveno večje, da bi bil opazen dvig gladine za npr. 10 cm. So pa takšne razlike pomembne za načrtovanje različnih vodnih zgradb, naprav in ureditev, saj navadno pri računu gladin uporabljamo pretoke manjše verjetnosti nastopa, pomanjkljiva hidravlična presoja pa lahko vodi k škodljivem delovanju voda na elemente grajenega okolja.

Mostni oporniki zasedajo (zaprejo) del pretočnega profila. Zaradi manjšega pretočnega profila se na taki lokaciji lokalno spremeni hitrost, hkrati pa nastanejo lokalne izgube energije. Mostni opornik predstavlja lokalno oviro, ki spremeni režim toka oz. bistveno vpliva na potek gladine (Slika 61, zgoraj). Pred mostnim opornikom se ustvari t.i. zastojna točka, kjer je gladina vode enaka energijski višini, kar je razvidno tudi iz fotografije (Slika 61, vir fotografije: Potočnik, 1998).



Slika 61: Ujemanje med izmerjenimi in modeliranimi gladinami.

Fig. 61: Accordance between measured and modelled water level.

Zaradi povečanja lokalnih hitrosti (v mirnem toku) ob opornikih se poveča tudi strižna hitrost oz. lokalna vlečna sila. S tem se spremenijo razmere v toku, zato se lahko pojavi lokalna erozija zaradi vpliva opornikov, kar pa povzroča spremembe v geometriji prečnega profila vodotoka in poteku zemeljskega površja.

Potek gladine v prečnem profilu torej ni horizontalen, ampak nanj vplivajo različne lokalne motnje. Podobno je tudi, ko se tok giblje skozi krivino, se pojavi zvišanje vodne gladine na zunanjem bregu in ustrezno znižanje gladine ob notranjem bregu. Posebno pri višjih hitrostih toka je potrebno upoštevati to razliko vodnih gladin (Steinman, 1999).

Kot je tudi vidno iz fotografije, dejanski potek gladine in oblika vodnega telesa v stiku z atmosfero ni samo ukrivljena ploskev. Doseganje ujemanja med izmerjenimi in modeliranimi gladinami je zato težko doseči, saj vsaka lokalna motnja v vodotoku zahteva detajlno hidravlično (eksperimentalno) obdelavo. Le v nekaterih primerih (ko lokalne izgube niso bistvene oz. ko gre za enostavne geometrijske oz. hidravlične razmere), jih je možno vključiti v običajen račun gladin in jih upoštevati z izračunom preko ustreznih koeficientov za lokalne izgube (Steinman, 1999).

Za razumevanje vodnih sistemov, kjer se prepleta veliko različnih procesov, je zato treba uporabiti primerna orodja, da je možno kompleksne pojave razumeti na podlagi vizualne informacije. Umeščanje vodnih sistemov v navidezno okolje omogoča nove načine preučevanja ugotavljanje skladnosti in interakcij med izmerjenimi in modeliranimi podatki.

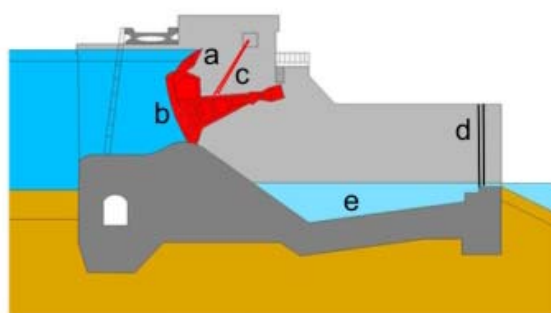
7.3 Dinamični elementi modelov vodnih sistemov v navideznem okolju

V trirazsežnem prostoru je vključitev časovno odvisnih podatkov razdeljena na prikazovanje: (i) sprememb elementov navideznega okolja (npr. spreminjanje gladine s časom zaradi sprememb pretoka ali obratovanja vodnih naprav ipd.) in (ii) fizikalnih, kemijskih ipd. količin v elementih navideznega okolja (npr. spreminjanje tlakov v vodovodnem sistemu ipd.). Združevanje podatkov, ki ga danes opravljajo orodja GIS, delno omogoča integracijo časovne dimenzije ter interakcijo le-te z uporabnikom in ostalim delom (statičnega) okolja. Na tem

področju je opaziti intenziven razvoj (npr. razširitev Chronological Analyst za ESRI ArcGlobe aplikacijo), zato se pričakuje, da bo prikaz časovno odvisnih elementov na podlagi podatkovnih baz podatkov omogočen že v naslednjih letih.

Za prikaz uporabe dinamičnih elementov vodnih sistemov v navideznem okolju smo izbrali obratovanje zaporničnih elementov v prelivnem polju HE Vrhovo. Namen simulacije je bil prikaz premikanja segmentne zapornice in zaklopke na njej, kar je pogosta kombinacija na hidroelektrarnah (Slika 62). V prelivnem polju so možni naslednji premiki:

- premik zaklopke v zgornjem delu za natančno uravnavanje gladine, ki hidravlično deluje kot krivočrtni, ozračeni preliv,
- premik segmentne zapornice z zaklopko kot celote navzgor; tok vode, ki izteka izpod zapornic, je hidravlično dimenzioniran kot tok vode iz odprtine (ta primer na sliki ni prikazan), in še
- kombinacija obeh prej opisanih obratovanj.



Legenda:

- a zaklopka
- b segmentna zapornica
- c hidravlični sklop
- d utor zapornic za remont
- e podslapje

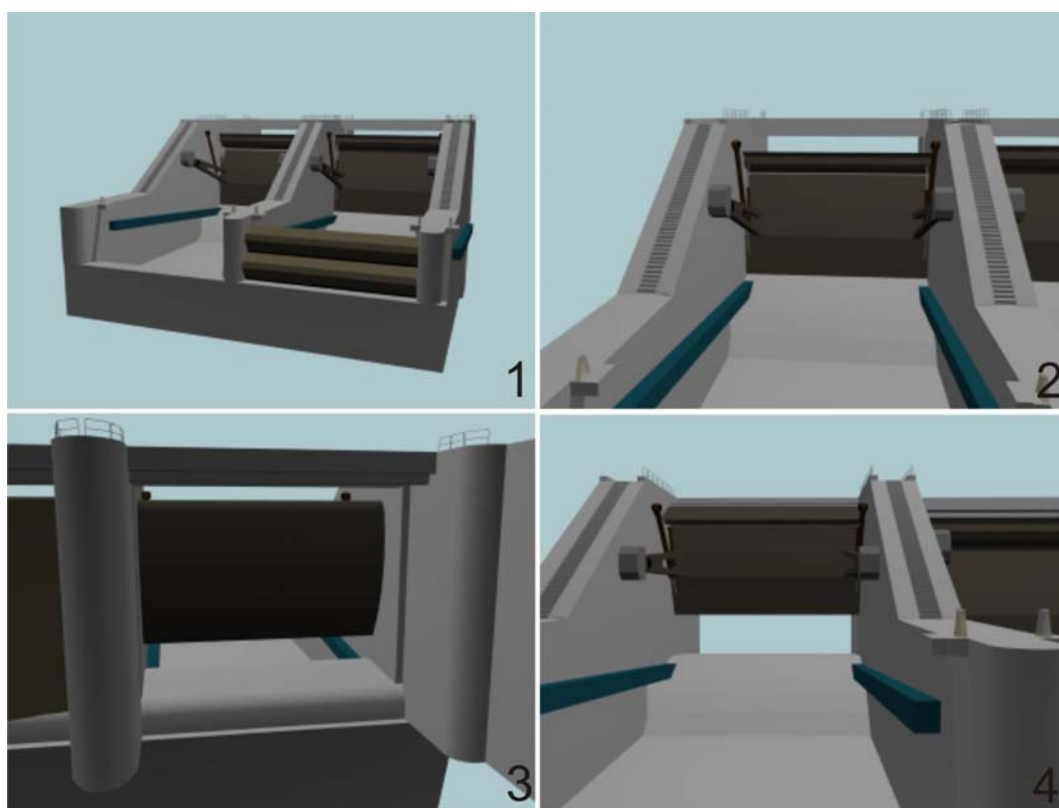
Slika 62: Shema prelivnega polja.

Fig. 62: Scheme of spillway.

Ker predstavlja tovrstno modeliranje dinamike zaporničnih elementov (zaklopka, segmentna zapornica, hidravlični sklopi ipd.) naprednejša orodja za upodabljanje, je bilo treba za upodabljanje uporabiti druga orodja, kot prej predstavljeno GIS orodje. Uporabljena je bila programska oprema Alias Maya, ki omogoča popolno 3R modeliranje prostorskih objektov. Ker pa je namen razvoja te programske opreme namenjen pretežno za izdelavo realističnih upodobitev (npr. v filmski industriji), ni možna povezava programske opreme za upodabljanje z atributnimi bazami podatkov. Pri izdelavi modela so bili uporabljeni 2R načrti, izdelani v Autodesk AutoCAD-u.

Model je zgrajen iz teles, ki so bila modelirana z zvračanjem črt iz osnovnega vira podatkov, tj. 2R risb. Posebno zahtevna je bila upodobitev in simulacija obratovanja zaporničnih elementov, saj mora gibanje naprave potekati usklajeno z vsemi elementi hidravličnega dela, dvžnih ročic zapornic in zaklopke, ki je s tečajem pritrjena na segmentno zapornico. Model prelivnega polja prikazuje tudi nekatere dopolnilne elemente, npr. pomožne zapornice, stopnice, ograje, ter predlagane vgradnje izvirne rešitve – gredi na opornih stebrih (v modri barvi), za učinkovitejše delovanje podslapja. Slika 63 prikazuje izsek iz preleta po okolici prelivnega polja ob hkratnem obratovanju zaporničnih elementov polja, drugo polje pa je zaprto s pomočjo tablastih zapornic:

- zaprte zapornice in dvignjena zaklopka (Slika 63.1),
- pomikanje zaklopke (Slika 63.2),
- dvigovanje segmentnih zapornic, spuščena zaklopka že v skrajni legi (Slika 63.3) in
- zapornici (zaklopka, segmentna) sta dvignjeni (Slika 63.4), da ne ovirata vodnega toka.



Slika 63: Simulacija obratovanja zaporničnih elementov prelivnih polj HE Vrhovo.

Fig. 63: Simulation of HPP Vrhovo gates operation.

Model prelivnih polj in simulacija obratovanja zaporničnih elementov bi lahko bila združena še s podatki hidravličnega modela za račun gladin in vodnih tokov v podslapju, vendar bi tedaj vodna masa zakrivala geometrijo vodne zgradbe oz. naprave. Izdelana simulacija dobro prikazuje dinamičnost navideznega okolja, za katero je bilo treba opraviti zahtevno modeliranje, ki je zamudno prav zaradi priprave velikega obsega razpoložljivih podatkov (2R CAD). Tovrstni modeli, vneseni v navidezno okolje, omogočajo raznovrstne interakcije z uporabnikom in ostalim delom (statičnega) navideznega okolja.

Simulacija obratovanja zaporničnih elementov HE Vrhovo je, v analognem zapisu prikazana z zaporedjem slik preleta, v PRILOGI B.

8 ZAKLJUČKI IN SKLEPI

Gospodarjenje z vodami se je z globalnimi (klimatskimi in gospodarskimi) spremembami in evropskimi integracijskimi procesi znašlo pred novimi izzivi. V proces intenzivne informatizacije celotne družbe se mora tudi gospodarjenje z vodami vključiti s svojim razvojem informacijskih tehnologij, ki pa seveda zahtevajo tudi drugačen, vodam bolj ustrezen pristop k obravnavani snovi. Ni namreč dopustno, da zaradi pomanjkanja podatkov, ali vedenja o razpoložljivih podatkih v drugih virih, ni mogoče ustrezno odločati in oblikovati politike do voda, saj uporabniki voda z vse širšo uporabo novejših tehnologij vršijo dodatne pritiske na rabo voda oz. na podeljevanje vodnih pravic.

Ker tudi v kartografiji nove tehnologije spreminjajo do sedaj uveljavljene načine uporabe karte (Petrovič, 2001), se te spremembe odražajo tudi v predstavitvi vodnogospodarskih podatkov in informacij. Cilj je nazornost, jasnost, strokovnjaki s posameznih področij pa morajo zagotoviti, kako to doseči. Ker je voda pomembna za vse, tudi vsi uporabniki vse bolj zahtevajo dinamična okolja prikazov in upravljanja s podatki, ki jih omogočajo tehnologije GIS in druge tehnologije (npr. 3R GIS, 3R CAD, navidezna resničnost).

8.1 Pregled in prikaz teze

Vsebina raziskovanja je prikazana v dveh pomembnejših sklopih, ki tvorita vsebinsko celoto: (i) prikaz teoretičnih izhodišč modelov vodnih sistemov v navideznem okolju ter (ii) razvoj konceptualnega modela umeščanja elementov vodnih sistemov v navidezno okolje in testiranje izdelanega modela.

V *Pregledu literature* je podan temeljit pregled dosegljive literature in stanja tehnike v svetu in v Sloveniji. Ugotovljeno je, da so področja raziskovanja na področju umeščanja vodnih sistemov v navidezna okolja pretežno predmet drugih znanstvenih disciplin, npr. informacijskih znanosti, znanosti s področja kartografije ipd. Vsebinske, vodnogospodarske analize modelov vodnih sistemov v navideznih okoljih pa v razpoložljivi literaturi ni zaslediti.

Detajlno prikazana *Definicija hipoteze* razdeli področje raziskovanja na teoretična izhodišča in na razvoj konceptualnega modela obravnavane teme. Prikazani so cilji in omejitve raziskave, saj je zastavljena tema široka in vzpodbuja k vključevanju številnih drugih znanosti, ki se navezujejo na vode, in vodi k uporabi novejših tehnologij upodabljanja grafičnih podatkov.

Poglavje *Teoretična podlaga in struktura raziskovanja* najprej definira ključne pojme in delovna območja, uporabljena v doktorski disertaciji, kot sta to npr. vodni sistem in navidezno okolje. Analizirane so definicije splošne teorije sistemov kot tudi načinov obravnave sistemov s področja vodnega gospodarstva. Nadalje so opredeljene tehnologije prikazovanja, ki so v raziskovanju metod in tehnoloških rešitev navideznega okolja (in navidezne resničnosti) uporabljene. Iz literature so povzete razpoložljive analize o uporabniških pričakovanjih, saj so to novejše tehnologije, ki pri uporabnikih še niso široko razširjene, a jih uporabniki z zanimanjem pričakujejo. Vsebinsko se teoretično raziskovanje umeščanja vodnih sistemov v navidezno okolje naslanja na standardiziran prikaz vodnogospodarskih tematskih kart (DIN 2425), saj je standardiziran sistem pojmov notranje homogen in navzven povezljiv. Standard, ki ni bil izdelan za prikazovanje in določanje topološke usmerjenosti, pa je zelo pomemben, ker v vsebinskem pomenu zajema celotno področje obravnave. Teoretično raziskovanje zaokrožuje prikaz postopkov hidravličnega modeliranja, saj je uporaba modelov vodnih sistemov najpomembnejši člen v izdelavi hidravličnih modelov in modeliranja vodnih sistemov.

Metodološka izhodišča za modeliranje vodnih sistemov v navideznem okolju prikazuje pregled pristopov v podatkovnem modeliranju in računalniški grafiki z namenom prikazati temeljne koncepte in načela uporabljena v disertaciji. Precej teh je sicer že uveljavljenih med strokovnjaki za področje geografskih informacijskih sistemov in računalniške grafike, ne pa tudi med strokovnjaki s področja voda. Poglavje smiselno naslavlja posamezne tematike: upodobitev, tehnologija prikazovanja, topologija, generalizacija, modeliranje in ponazoritev ter jih povezuje s področjem vodnih sistemov.

Nosilni del doktorske disertacije je prikazan v poglavju *Konceptualni model vodnih sistemov v navideznem okolju*, kjer so najprej opredeljene geometrijske lastnosti elementov

navideznega prostora, nato pa podana širša analiza elementov vodnih sistemov, razdeljena na vodne pojave ter na vodne zgradbe, naprave, ureditve in pravne režime. Poglavlje prikazuje metodološki pristop in dokazilo, da je ključni element modelov vodnih sistemov v navideznem okolju vodno telo, opredeljeno na način, kot ga podaja doktorska disertacija. S tem je poleg geometrijske opredelitve vodnih pojavov opredeljena tudi semantična opredelitev objekta v trirazsežnem prostoru. Ugotovljeno je, da so vodne zgradbe, naprave, ureditve in pravni režimi, ki so del grajenega okolja, katerih geometrija je določena (a se lahko s časom spreminja), pomemben robni pogoj vodnih teles, zato so prikazane nekatere relacije z vodnimi telesi. Podana je analiza vodnih zgradb, naprav, ureditev in pravnih režimov v takšnem obsegu, da je možno njihovo razvrščanje in utemeljenje, kateri deli vodnih zgradb, naprav, ureditev in pravnih režimov so bistveni za prikaz v navideznem okolju.

Razvit konceptualni model umeščanja modelov vodnih sistemov je prikazan na praktičnih primerih v poglavju *Prikaz uporabe modelov vodnih sistemov v navideznem okolju*. Podani so primeri upodobitve pravnih režimov morja, interakciji izmerjenih in modeliranih količin na primeru odseka vodotoka in primer modela prelivnih polj HE Vrhovo z dinamičnim prikazom obratovanja zapornic.

8.2 Potrditev teze in njena uporabnost

Živimo v trirazsežnem svetu. Znanstveniki in inženirji že vrsto let iščejo grafične izraze za razumevanje trirazsežnih prostorskih vidikov realnega sveta v obliki skic in risb. Razvoj računalniške tehnologije in metod simulacije omogoča, da v navideznih okoljih analiziramo kompleksne dinamične pojave. Takšen pristop omogoča manj odločitev tipa "poskušaj in pogreši" in več tistih, ki temeljijo na znanstvenih osnovah systemske analize in sinteze, saj so navidezna okolja lahko ustrezen prikaz naravnih ali organizacijskih sistemov.

V navidežno okolje umeščeni vodni sistemi omogočajo obravnavo toka vode brez diskontinuitet, kar v dosedanjih dvorazsežnih prikazih (npr. GIS, CAD) ni bilo uspešno modelirano. Obravnava modelov vodnih sistemov z neprekinjenostjo vodnega toka v navideznem okolju omogoča pridobivanje novih znanj o obnašanju sistema in relacij z

okoljem, saj je upoštevanje zakona o ohranitvi mase (kontinuitetna enačba) ena od osnovnih zakonitosti obravnave toka vode.

V zadnjih letih je razvoj prostorskih informacijskih sistemov napovedal naslednjo generacijo uporabe podatkov – trirazsežnih geometrijskih podatkov (npr. 3R CAD, 3R GIS, ipd.). Prehod iz dvorazsežne v trirazsežno obravnavo geometrijskih podatkov pa ni povsem enostaven in tekoč, saj zahtevajo objekti v trirazsežnem prostoru drugačno obravnavo. Vodni sistemi so, zaradi prepletanja procesov, ki se v njih dogajajo in interakcije z okoljem, zelo kompleksni pojavi, zato je za razumevanje le-teh potrebno uporabiti temu primerno napredna orodja. Izhajali smo iz teze, da navidezno okolje lahko ponudi zelo naravna okolja tudi za upodobitev znanstvenih podatkov, ki so lahko vključeni v modele okolja, na katere se nanašajo oz. v katerem se nahajajo. Trditev je na primeru vodnih pojavov dokazana s konceptualnim modelom vodnih sistemov v navideznem okolju. Z razvitim konceptualnim modelom, v katerem je najpomembnejši objekt trirazsežnega prostora - vodno telo, je prikazana in verificirana metodologija obravnave elementov vodnih pojavov v trirazsežnem prostoru. Rezultati metodologije dokazujejo, da je možen in potreben preskok iz dvorazsežne v trirazsežno obravnavo vodnih sistemov, saj je možno s prostorskimi funkcijami prikazati nekatere elemente v prostoru, ki so bistveni za gospodarjenje z vodami, npr. poplavna območja, ko vodno telo leži na zemeljskem površju, razsežnost vodnega telesa pa je odvisna od masnega pretoka (vode, sedimentov). Ker vodno telo obravnavam kot telo v prostoru, je ustrezen prikaz vodne gladine krivočrtna ploskev, odvisna od dejanskih ali modeliranih vrednosti. Prikazana metodologija umestitve modelov vodnih sistemov v navidezna okolja omogoča tudi nove načine za preučevanje interakcije med izmerjenimi in modeliranimi podatki o vodnih sistemih.

Rezultati uporabe izdelane metodologije prikazujejo, da je možen in potreben preskok iz obstoječih pristopov in sistemov za ravnanje s podatki o vodnih sistemih, ki slonijo predvsem na dvorazsežnem prikazovanju, na dinamična trirazsežna navidezna okolja, saj je z modelom, ki opisuje vodna telesa, mogoče odkrivanje novih znanj o vodnih sistemih in v povezavi s sistemi drugih področij, ta znanja prenašati tudi v druge znanstvene discipline, npr. vplive spreminjanja razsežnosti (in s tem globine vode) na favno in floro, v vodna telesa pa vključevanje novejših metod hidravličnega modeliranja, kot je metoda Smoothed Particle

Hydrodynamics theory ipd. Prikazana vključitev časovne dimenzije v statične elemente navideznega okolja bo omogočala tudi preglednejše zaznavanje obnašanja vodnega sistema znotraj samega vodnega sistema in nasproti drugim sistemom.

8.3 Sinteza ugotovitev

Poudarek umeščanja vodnih sistemov v navidežno okolje je na oblikovanju zasnove in vsebinskih načel ter njihovega udejanjanja in ne na uporabniški tehnični rešitvi. Prav tako ni namen prikazanih rešitev poseganje v kartografijo, saj smatram, da vsebine umeščanja vodnih sistemov v navidežno okolje dopolnjujejo metode, ki jih kartografi že uporabljajo za izdelavo 3R kart (geografska lega, preslikava objektov, projekcije ipd.) s tematskimi vsebinami, ki so značilne za področje gospodarjenja z vodami.

Raziskovalno delo v doktorski disertaciji je prispevalo naslednje ugotovitve:

- razvoj konceptualnega modela pospešuje prehod iz dvorazsežnih v trirazsežna grafična okolja, saj je dokazana uporabnost modelov (vsebinska poenostavitev modeliranja);
- v navidežno okolje umeščeni modeli vodnih sistemov omogočajo poenostavitev nabora objektov trirazsežnega prostora,
- ključni objekt trirazsežnega prostora je model vodnega telesa, ki predstavlja v navideznem okolju telo, pretežno sestavljeno iz vode oziroma telo, v katerem je voda gonilo procesov,
- model vodnega telesa je v primeru:
 - o toka s prosto gladino omejen z zemeljskim površjem, geometrijo vodnogospodarskega objekta, naprave ali ureditve in gladino, ki je v stiku s atmosfero;
 - o v primeru toka pod tlakom omejen z neprepustnimi zemljinami/kameninami ali geometrijo vodnega objekta.
- gladina je v navideznem okolju predstavljena kot samostojna ukrivljena ploskev ali ploskev kot del telesa (vodnega telesa); gladina ne more biti predstavljena kot horizontalna ravnina, saj ponazarja dejanski (modeliran ali merjen) potek gladine;

- pristop k modeliranju vodnih sistemov v navideznem okolju temelji na kontinuiteti vodnega toka (zakon o ohranitvi mase – kontinuitetna enačba), tj. posamezni modeli vodnih teles se stikajo, zato tok vode ne more biti prekinjen, česar v do sedaj uporabljenih dvorazsežnih modelih ni bilo možno zadovoljivo uveljaviti;
- umeščanje grajenega okolja v navidezno okolje ni problematično, saj je geometrija objektov znana, od uporabnika modela pa je odvisno, kolikšno stopnjo posploševanja bo uporabil, da bo model še vedno veljaven oziroma dovolj informativen;
- nekateri elementi v prostoru so neposredno odvisni od razsežnosti vodnega telesa, zato teh elementov prostora ni treba določati posebej, ker se lahko izračunajo s prostorskimi funkcijami, npr. poplavna območja, pribrežna zemljišča, obala ipd.;
- navidezno okolje omogoča primernejšo upodobitev trirazsežnih objektov s spremenljivo geometrijo, saj je npr. gibanje zapornic v navideznem okolju prikazano z gibanjem vseh delov naprave (hidravličnih sklopov, segmentov zapornic ipd.).
- navedeno potrjuje obe tezi:
 - o s konceptualnim modelom vodnih pojavov je dokazano, da je možno v navidezna okolja vključiti modele vodnih sistemov, ter
 - o da je prehod iz dvorazsežnih v dinamična trirazsežna okolja potreben zaradi ustrežnejše organizacije modelov vodnih sistemov.

8.4 Izzivi: Raziskave in razvoj

Uporaba navideznega okolja se je z razvojem grafičnih zmogljivosti računalniške tehnologije bliskovito razširilo v vse veje znanosti in raziskovanja. Pomembnejše vidike nadaljnjih raziskav, razvoja in eksperimentov v umeščanju modelov vodnih sistemov v navideznem okolju lahko strnem v naslednje ugotovitve:

- V analizi elementov vodnih sistemov so prikazani glavni elementi vodnih pojavov, zato je treba v nadaljnji razvoj vključiti tudi posebnosti vodnih pojavov in razviti nove metodologije obravnave prostorskih podatkov s področja voda glede na obravnavano vodno telo.
- Vodno telo je predstavljeno kot telo v prostoru in predstavlja mejo telesa. V nadaljnjih raziskavah bo potrebno določiti tudi načine prikazovanja različnih fizikalnih (hitrosti

toka vode, razporeditev tlakov ipd.) in kemijskih količin (npr. koncentracija in razporeditev različnih snovi v vodi ipd.) v različnih delih (v notranjosti) vodnega telesa.

- Raziskati bo treba grafične mehanizme "komunikacije" med vodnimi telesi, npr. prehajanje vode med vodotokom in podzemno vodo ali med vodnim telesom in vodnogospodarskim objektom, napravo, ureditvijo ipd.
- Topološko je treba opredeliti izdelavo modelov vodnih sistemov (npr. z vidika povezljivosti, zaporednosti, sosedskih odnosov ipd.).
- Določiti bo treba trirazsežne topološke relacije⁷ (npr. realizacije⁸, odvisnosti⁹ ipd.) med posameznimi objekti in deli objektov v navideznem okolju, npr. kako vključiti vpliv spremembe gladine vode v vodotoku na podzemne vode (ki ga sicer izračunamo s hidravličnim modelom).
- Raziskati in preveriti bi bilo treba primernost modeliranja modelov vodnih pojavov z metodo proizvodnega modeliranja (CSG gradniki).
- Ugotoviti bo treba morebitne kolizije teles modelov vodnih sistemov z drugimi objekti in sistemi v navideznem okolju, npr. kako vpliva vodno telo na urbane strukture, tj. vdor vode v objekt na poplavnem območju.
- Analizirati vidnosti objektov pod zemeljskim površjem, naprav v vodnih zgradbah ipd.
- Manipulacija s trirazsežnimi objekti se uvršča bolj v domeno informacijskih znanosti, vendar pa bo s stališča uporabnosti navideznega okolja treba preiti na tehnologije, ki so sorodne s tehnologijami navidezne resničnosti.
- Zaradi velikih količin podatkov se bo široko polje raziskav ukvarjalo tudi z ustreznim umeščanjem trirazsežnih objektov v podatkovne baze.
- Potrebna bo prilagoditev/posodobitev/dopolnitev systemske arhitekture poizvedb.
- Vključevanje časovne komponente v navidezno okolje, saj je čas oz. dinamika vodnih teles razen geometrije objektov najpomembnejša informacija.
- Razvoj načel za realistično upodabljanje vodnih pojavov, pri čemur naj ne bi posegali v natančnost in podrobnost prikazovanih objektov.

⁷ Relacija je izbrana pomenska povezava ali odnos med objektnimi tipi (razredi), ki jo je glede na pomembnost treba vključiti v podatkovni model (Šumrada, 2005b).

⁸ Realizacija je pomenska relacija med objektnimi tipi, kjer je določen razred obvezan izvesti opravila, ki jih nudi drugi razred (vmesnik ali pa abstraktni razred) (Šumrada, 2005b).

⁹ Odvisnost je relacija med objektnimi tipi, kjer sprememba znotraj enega razreda (neodvisnega) lahko vpliva na pomen ali delovanje drugega (odvisnega) (Šumrada, 2005b).

- Razvoj potrebnih nivojev podrobnosti grafičnega prikaza: npr. v večji oddaljenosti se nekatere podrobnosti modela vodnega sistema ne opazijo, a je viden že drugi vodni sistem, zato uporabnik lahko razbere potrebne relacije med njima.
- Testiranje modelov z orodji navidezne resničnosti in dopolnjevanje potopitve v model tudi z drugimi čutili, npr. sluh (pri slapovih) ipd.
- Na podlagi izdelanega konceptualnega modela vodnih sistemov v navideznem okolju bo pričakovano vzpodbujena izdelava informacijskih sistemov s področja voda v trirazsežnem grafičnem okolju.
- Razviti je treba prostorske funkcije, ki bi v trirazsežnem prostoru omogočile izračune oz. rudarjenje podatkov, pomembne za gospodarjenje z vodami, kateri temeljijo na razsežnostih vodnega telesa, npr. poplavna območja, pribrežna zemljišča, vplivna zemljišča voda ipd.
- Predstavljen konceptualni model vodnega telesa je primeren za prikaze z novjšimi metodami modeliranja dinamičnih lastnosti vode, npr. Smoothed Particle Hydrodynamics Theory, saj je ponazoritev fizikalnih lastnosti (čista voda, blatni tok, plavine) delov telesa vode s "kroglicami" primerna z že preizkušenimi predstavitvenimi tehnikami (Koutek, 2003).
- V navidezno okolje umeščeni vodni sistemi se lahko, ob ustrezni posplošitvi, vključujejo kot objekti v kartografskih modelih.

Raziskave na področju navideznega okolja intenzivno potekajo na področju informacijskih tehnologij. Raziskovalci drugih področij nova razvita orodja uspešno testirajo in uporabljajo za pridobivanje novih znanj. Uporaba navideznega okolja je že vključena v pomembne veje znanosti, npr. medicina, strojništvo ipd., kjer je bila dokazana njena uporabnost. Zato pričakujem, da bo tovrstna metodologija in tehnologija vključena tudi v gospodarjenje z vodami.

9 POVZETEK

Oblikovanje vodnogospodarskih vsebin na kartah se je razvijalo desetletja. Z razvojem novih informacijskih tehnologij upravljanja s prostorskimi podatki in zmožnostmi prikazovanja pa je potrebno tudi za vodnogospodarske vsebine izdelati vizualni in vsebinski preskok umeščanja vodnih sistemov v različna informacijska okolja. Doktorska disertacija obravnava načela umeščanja elementov vodnih sistemov v navidezno okolje in podaja načine opredeljevanja elementov vodnih sistemov v trirazsežnem okolju.

Opremljen je pojem modela vodnega sistema in pojem navideznega okolja, kot univerzalnega trirazsežnega okolja, izdelanega z informacijsko tehnologijo, ki omogoča obravnavo novih razsežnosti vodnih sistemov (npr. realistična upodobitev, čas ipd.). Ključne opredelitve izhajajo iz matematičnih in fizičnih modelov vodnih sistemov, saj naj bi se v navideznem okolju izmerjeni podatki o stanju vodnih sistemov in rezultati modeliranja združevali v enotnem okolju.

V zadnjih letih je razvoj prostorskih informacijskih sistemov napovedal naslednjo generacijo uporabe podatkov – trirazsežnih geometrijskih podatkov (npr. 3R CAD, 3R GIS ipd.). Prehod iz dvorazsežne v trirazsežno obravnavo geometrijskih podatkov ni povsem enostaven in tekoč, saj zahtevajo objekti v trirazsežnem prostoru drugačno obravnavo. Vodni sistemi so zaradi prepletanja procesov, ki se v njih dogajajo, in interakcije z okoljem, zelo kompleksni pojavi, zato je za razumevanje le-teh treba uporabiti temu primerno napredna orodja. Navidezno okolje lahko ponudi zelo naravna okolja za upodabljanje znanstvenih podatkov, ki so lahko vključeni v modele okolja, na katere se nanašajo oz. v katerem se nahajajo. Trditev je na primeru vodnih pojavov dokazana s konceptualnim modelom vodnih sistemov v navideznem okolju. Z razvitim konceptualnim modelom, v katerem je najpomembnejši objekt trirazsežnega prostora "vodno telo", je prikazana in verificirana metodologija obravnave elementov vodnih pojavov v trirazsežnem prostoru. Uporaba metodologije dokazuje, da je potrebno obravnavati vodne sisteme v trirazsežnem okolju, saj je možno s prostorskimi funkcijami prikazati vse elemente v prostoru, ki so bistveni za gospodarjenje z vodami. Preverjanje zasnove in metodologije je bila opravljeno za poplavna območja, ko vodno telo

visokih voda naleže na zemeljsko površje, razsežnost vodnega telesa pa je odvisna od masnega pretoka (vode, sedimentov). Ker vodno telo obravnavamo kot telo v prostoru, je ustrezen prikaz gladine ploskev odvisen od dejanskih ali modeliranih vrednosti oz. procesov. Izdelana metodologija umestitve modelov vodnih sistemov v navidezna okolja prav tako omogoča tudi nove načine preučevanja skladnosti med izmerjenimi in modeliranimi podatki o vodnih sistemih.

V navidezno okolje umeščeni vodni sistemi omogočajo obravnavo vodnih tokov brez diskontinuitet, kar v dosedanjih dvorazsežnih prikazih (npr. GIS, CAD) ni bilo uspešno modelirano. Obravnava modelov vodnih sistemov z neprekinjenostjo vodnega toka v navideznem okolju omogoča poglobljene raziskave o obnašanju sistema in o relacijah z okoljem, saj je upoštevanje zakona o ohranitvi mase (kontinuitetna enačba) eden od osnovnih pogojev za obravnavo toka vode.

Rezultati metodologije prikazujejo, da je možen preskok iz obstoječih pristopov in sistemov za ravnanje s podatki o vodnih sistemih, ki slonijo predvsem na dvorazsežnem prikazovanju, na dinamična trirazsežna navidezna okolja, in da je z definiranim vodnim telesom mogoče odkrivanje novih znanj o vodnih sistemih in, v povezavi s sistemi drugih področij, ta znanja prenašati tudi v druge znanstvene discipline, ko se obravnava npr. vplive spreminjanja razsežnosti (in s tem globine vode) na favno in floro, ali pa pri rabi novejših metod hidravličnega modeliranja, kot je metoda Smoothed Particle Hydrodynamics Theory ipd. Prikazana vključitev časovne dimenzije v statične elemente navideznega okolja bo omogočala tudi preglednejše zaznavanje obnašanja vodnega sistema znotraj samega vodnega sistema in nasproti drugim sistemom.

Razvit konceptualni model umeščanja modelov vodnih sistemov je verificiran na praktičnih primerih: upodobitve pravnih režimov morja, ugotavljanje skladnosti izmerjenih in modeliranih količin na primeru odseka vodotoka ter na primeru dinamičnega modela prelivnih polj HE Vrhovo s prikazom obratovanja zapornic.

10 SUMMARY

Maps with water management contents have been drawn for decades. Due to the development of new information technologies for spatial data management and to possibilities of presentation (3D GIS and virtual reality), it is necessary to make a visual and material shift with placing water systems into various information environments also as regards water management contents. The thesis deals with the principles of placing water system elements in virtual environment and presents the methods of defining the meaning of water system elements in three-dimensional environment.

It defines the notion of a water system model and virtual environment as universal three-dimensional environment created with information technology which allows treatment of new dimensions of water systems (e.g. realistic presentation, time, etc.). Key definitions are derived from mathematical and physical models of water systems, since in virtual environment the data on water system situation and the results of modelling should be union in the same environment.

In the last few years, the development of information systems announced the next generation of the use of data – three-dimensional geometrical data (e.g. 3D CAD, 3D GIS, etc.). Passing from two-dimensional to three-dimensional treatment of geometric data is not quite so simple and fluent since objects in three-dimensional space require different treatment. Due to intertwined processes, which occur in them, and their interactions with the environment, water systems are complex phenomena, therefore their understanding requires suitably advanced tools. Virtual environment can offer very natural environments for visualisation of scientific data which can be included into models of environment to which they relate or in which they are situated. The statement is proved on an example of water phenomena by conceptual model of water systems in virtual environment. The developed conceptual model, in which the most important object of three-dimensional space is a "water body", presents and verifies the methodology of treatment of water phenomena elements in three-dimensional space. The usefulness of the methodology show that a shift from two-dimensional to three-dimensional treatment of water systems is necessary since spatial functions allow presentation of all

elements in space, which are essential to water management, Verification of frame in methodology was performed for flood areas, since a water body of high water flow is situated on the earth's surface, while the dimension of a water body depends on the mass flow (water, sediments). Since a water body is treated as a body in space, suitable presentation of a water surface is with surface, depends on real or modelled values. The elaborated methodology of placing water system models in virtual environments allows also new ways of studying uniformity between measured and modelled data on water systems.

Water systems placed in virtual environment allow treatment of water flow without discontinuity, which in the two-dimensional presentations so far (e.g. GIS, CAD) has not been successfully modelled. Treatment of water system models with water flow continuity in virtual environment allows deep researches on the system behaviour and relations with the environment since taking into account the law of conservation of mass (continuity equation) is one of the basic rules of water flow treatment.

The results of the methodology show that it is possible to make a shift from the existing approaches and systems for water system data management based principally on two-dimensional presentation to dynamic three-dimensional virtual environments, since a model describing water bodies allows acquiring new knowledge on water systems and, in relation to systems from other areas, transferring this knowledge to other scientific disciplines, when dealing with impacts of changing dimensions (and thus water depth) on fauna and flora or using the latest methods of hydraulic modelling in water bodies, such as Smoothed Particle Hydrodynamics Theory, etc. The presented inclusion of time dimension in statistical elements of virtual environment will also allow more transparent perception of water system within the water system itself and against other systems.

The developed conceptual model of placing of water system models is verified on practical examples of visualisation of legal systems of the sea, as regards the uniformity of measured and modelled quantities, on an example of a river section and on example of dynamic model of HPP Vrhovo spillway operation.

VIRI

- Alemseged, T. H. 2005. Integrating Hydrodynamic Model and High Resolution DEM For Flood Modelling. Enshede. ISPRS WG III/3 Workshop "Laser scanning 2005", International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36, 3.
- Banovec, P. 2001. Povezovanje sistema vodnogospodarskih podatkov s sistemom standardnih klasifikacij. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 126 str.
- Batty, M., Howes, D. 1996. Exploring urban development dynamics through visualization and animation. V: Parker, D. (ur.). Innovations in GIS 3, New York, Taylor & Francis: 149-161.
- Billen, R., Zlatanova, S. 2003. 3D spatial relationship model: A useful concept for 3D cadastre? Computers, Environment and Urban Systems, 27, 4: 411-425.
- Blaha, M., Rumbaugh, J. 2004. Object-Oriented Modelling and Design with UML, (Second Edition), New Jersey, Prentice Hall.
- Bragdon, C., Juppé, J. Georgiopoulos. 1995. Sensory spatial systems simulation (S^4) applied to the master planning processes: East Coast and West Coast case studies. London, Environment and Planning B: Planning and Design, Pion, 22: 303-314.
- Brilly, M., Šraj, M. 2005. Osnove hidrologije, univerzitetni učbenik. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- Brooks, P.P. 1999. What's Real About Virtual Reality?. Virtual Reality, IEEE Computer Graphics and Applications, Los Alamitos, CA, USA. IEEE Computer Society Press, 19, 6: 16-27.
- Bryson, S. 1994a. Approaches to the Successful Design and Implementation of VR Applications. London, UK, Academic Press Ltd.: 3-15.
- Bryson, S. 1994b. Virtual Environments in Scientific Visualization. Proceedings of the conference on Virtual reality software and technology 1994. Singapore. World Scientific Publishing Co.: 201-220.
- Chanson, H. 1999. The Hydraulics of Open Channel Flow. London, Butterworth-Heinemann: 630 str.

- Chung, K.C. 1999. Three-dimensional analysis of airflow and contaminant particle transport in a partitioned enclosure. London, Environment and Planning B: Planning and Design, Pion, 34: 7-17.
- Danahy, J. 1997. A set of visualization data needs in urban environmental planning & design for photogrammetric data. Monte Verita, Switzerland, Proceedings of the Ascona Workshop'97: Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images. Basel, Birkhauser Verlag: 357-365.
- DIN 2425. 1998 (E). Panwerke für die Versorgungswirtschaft, die Wasserwirtschaft und für Fernleitungen – Karten und Plane der Wasserwirtschaft.
- Direktiva o vodah - Direktiva Evropskega parlamenta in sveta 2000/60/ES z dne 23. oktobra 2000 o določitvi okvira za ukrepe Skupnosti na področju vodne politike.
- Doyle, S., Dodge, M., Smith, A. 1998. The potential of web-based mapping and virtual reality technologies for modelling urban environments. Computers, Environment and Urban Systems, 22, 2: 137-155.
- Eichelberger, P. 1998. 3D GIS: The necessary next wave. Newton, USA, Geo Info System: 8.
- Faust, N.L. 1995. The virtual reality of GIS, London, Environment and Planning B: Planning and Design, 22: 257-268.
- Flick, S. 1996. An object-oriented framework for the realization of 3D Geographic Information Systems. Barcelona, Spain, Second Joint European Conference & Exhibition on Geographical Information, IOS Press: 187-196.
- Emgard, K.L., Zlatanova, S. 2008. Design of an integrated 3D information model. Urban and regional data management: UDMS annual 2007, London: 143-156.
- Foley, J.D., van Dam, A., Feiner, S.K., Hughes, J.F. 1995. Computer Graphics: Principles and Practice. 2nd ed., Indianapolis, Addison-Wesley Professional: 1200 str.
- Forrester, J.W. 1961. Industrial dynamics, Cambridge Massachusetts, The M.I.T. Press: 466 str.
- Fuchs, C. 1996. OEEPE study on 3D city models. Report of the institute for Photogrammetry, Bonn, University of Bonn, 45.
<http://www.ipb.uni-bonn.de/OEEPE/oepe.html>.

- Gong, H., Hu, Z., Zhao, W., Li, X., Wang, Y., Gong, Z., Zhang, S. 2007. Three dimensional groundwater virtual reality system and its spatial database. V: Ignasi Corbella (ur.) IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. Barcelona, IEEE International: 4741-4744.
- Gosar, L. 1996. Povezava računa gladin v odprtih vodotokih in CAD sistema. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Hidrotehnična smer: 78 str.
- Gosar, L. 2000. Raba morja v gospodarjenju z vodami. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Podiplomski študij hidrotehnične smeri, 158 str.
- Gosar, L., Steinman, F., Rak, G. 2006a. Analiza hidravličnih lastnosti vodotokov z uporabo GIS orodja. GIS v Sloveniji 2005-2006. Ljubljana, Založba ZRC: 123-131.
- Gosar, L., Prešeren, T., Kozelj, D., Steinman, F. 2006b. ALPRESERV Database : Sharing Information on Reservoirs. Baden, Wasser, Energie, Luft, Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband, 3: 198-206.
- Gosar, L., Steinman, F., Rak, G. 2008a. Coniranje prostora poplavne nevarnosti: Metodologija in potrebni podatki. Ljubljana, Goljevščekov spominski dan 2008, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Hidrotehnična smer, prosojnica.
- Gosar, L., Steinman, F., Rak, G. 2008b. Umeščanje vodnih sistemov v prostorske vizualizacije. V: Perko, D. et al. (ur.) Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2007-2008. Ljubljana, Založba ZRC: 161-169.
- Gruber, M., Kofler, M., Leberl, F. 1997. Managing large 3D urban data base contents supporting photo-texture and levels of details. Proceedings of the Ascona Workshop '97: Automatic Extraction of Man-made objects from Aerial and Space Images. Basel, Birkhäuser Verlag: 377-386.
- Grün, A., Dan, H. 1997. TOBAGO – a topology builder for the automated generation of building models. Proceedings of the Ascona Workshop '97: Automatic Extraction of Man-made objects from aerial and space images. Basel, Birkhäuser Verlag: 149-160.
- Haase, H. 1994. How Scientific Visualization Can Benefit from Virtual Environments. CWI Quarterly, 7, 2: 159-174.

- Haber, R.B., McNabb, D.A. 1990. Visualizations idioms: A conceptual model for scientific visualization systems. V: Nielson, G.M., Shriver, B.D., Rosenblum, L. (ur.), Visualization in scientific computing. Washington, IEEE Computer Society Press: 75-83.
- Hall, R. 1990. Algorithms for Realistic Image Synthesis. New York, Computer Graphic Techniques: Theory and Practice: 189-231.
- Horvat, A., Steinman, F., Gosar, L., Banovec, P., Papež, J., Vrabec, M. 2001. Katalog vodnogospodarskih objektov in naprav ter vodnih pojavov. Ljubljana, Podjetje za urejanje hudournikov d.d., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem: 74 str.
- Kainz, W. 1990. Spatial relationships – topology versus order. Proceeding of the 4th International Symposium on spatial data handling. Zurich, Switzerland: 814-819.
- Kljajić M. 2002. Teorija sistemov. Moderna organizacija: 238 str.
- Kobold, M. 2007. Vpliv napake ocene padavin na napako napovedi odtoka pri napovedovanju poplav. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 134 str.
- Koutek, M. 2003. Scientific Visualization in Virtual Reality: Interaction Techniques and Application Development. Delft, Ph. Thesis, Delft University of Technology: 251 str.
- Könninger, A., Bartel, S. 1998. 3D-GIS for urban purposes. GeoInformatica, 2, 1: 79-103.
- Kwan, M.P. 2000. Interactive geovisualization of activity-travel patterns using 3D GIS: A methodological exploration with a large datasets. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Elsevier, 8, 1-6: 185-203.
- Kwan, M.P., Lee, J. 2005. Emergency response after 9/11: The potential of real-time 3-D GIS for quick emergency response in micro-spatial environments. Computers, Environment and Urban Systems, 29: 93-113.
- Lee, Y.C. 1990. Geographic information systems for urban applications: Problem and solutions. Environment and Planning B: Planning and Design, 17, 4: 463-473.
- Liggett, R.S., Jepson, W.H. 1995. An integrated environment for urban simulation. Problems and solutions, Environment and Planning B: Planning and Design, 22, 3: 291-302.

- Lu, W. Z., Zhang, W. S., Cui, C. Z., Leung, A. Y. T. 2004. A numerical analysis of free-surface flow in curved open channel with velocity-pressure-free-surface correction. Berlin, Computational Mechanics, 33, 3: 215-224.
- Mandelbrot, B.B. 1999. The Fractal Geometry of Nature: updated and augmented. New York, WH Freeman and Company: 468 str.
- Margeta, J. 1992. Osnove gospodarenja vodama. Split, udžbenik, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu: 230 str.
- Mikoš, M., Mastnak, M. 1998. Navodila za program HEC-RAS verzija 2.1. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 97 str.
- Molen, P.V.D. 2003. Institutional aspect of 3D cadastre. Computers, Environment and Urban Systems, 27, 4: 383-394.
- Okvirna direktiva o morski strategiji – Direktiva 2008/56/ES Evropskega Parlamenta in Sveta z dne 17. junija 2008 o določitvi okvira za ukrepe Skupnosti na področju politike morskega okolja.
- Opricović, S. 1992. Optimizacija sistema. Srbija, Beograd, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu: 422 str.
- Ostensen, O. 2001. The expanding agenda of Geographic Information Standards, ISO Bulletin, July, 2001, ISO: 16-21.
- Petrovič, D. 2001. Načela oblikovanja izraznih sredstev v tridimenzionalnih kartografskih prikazih. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za geodezijo: 130 str.
- Pilouk, M. 1996. Integrated Modelling for 3D GIS. PhD thesis. Netherlands, Wageningen, Wageningen University, Laboratory of geo-information science and remote sensing: 200 str.
- Pilouk, M., Petrovic, D., Grawford, C., Graff, C. 1997. Development of the ArcView 3D Analyst Extension. Proceedings of International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Stuttgart, 32, 3-4W2: 196-202.
- Pravilnik o določitvi vodne infrastrukture. UL RS, št. 46-1880/2005: 4666.
- Rak, G. 2006. Uporaba prostorskih podatkov v analizi hidravličnih lastnosti vodotokov. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za Vodarstvo in komunalno inženirstvo: 86 str.

- Rak, G., Steinman, F., Gosar, L. 2008. Kartiranje poplavno ogroženih območij v skladu z novo zakonodajo v Sloveniji. V: Perko, D. et al. (ur.) Geografski informacijski sistemi v Sloveniji 2007-2008. Ljubljana, Založba ZRC: 107-116.
- Rajar, R. 1980. Hidravlika nestalnega toka. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 279 str.
- Raper, J. 2000. Multidimensional Geographic Information Science. London, Taylor&Francis: 300 str.
- Sacks, R., Barak, R. 2006. A qualitative and quantitative assessment of the impact of 3D modelling of building structures on Engineering productivity. Haifa, Israel Institute of Technology, Technion Research and Development Foundation: 67 str.
- Shene C. K. 2003. CS3621 Introduction to Computing with geometry notes,
URL: <http://www.cs.mtu.edu/~shene/COURSES/cs3621/NOTES/>.
- Skupna strategija za implementacijo Direktive o vodah - Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC) Guidance Documents,
URL: <http://www.eeb.org/activities/water/wfdimplementation.html>.
- Steinman, F. 1999. Hidravlika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 296 str.
- Steinman, F., Gosar, L., Banovec, P. 2002. Pravni režimi na moru. Zagreb, Hrvatske vode, 10, 41: 409-417.
- Steinman, F., Gosar, L. 2002. Otok pred Izolo = An island in front of Izola. Ljubljana, Urbani izziv, 13, 1: 5-12, 101-104.
- Steinman, F., Gosar, L. 2008. Osnove gradbeništva. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 128 str.
- Stoter, J.E. 2002. 3-D cadasters, state of the art: From 2-D parcels to 3-D registrations. GIM International, The World Magazine for Geomatics, February 2002: 12-15.
- Sun Java.
URL: java.sun.com/.
- Sutherland, I.E. 1970. Computer Displays. Scientific American, 222: 57-81.
- Šantl, S. 2007. Makrokalibracija pri hidravličnem modeliranju vodooskrbnih sistemov. Magistrska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, magistrski študij hidrotehnične smeri: 130 str.

- Šumrada, R. 2005a. Tehnologija GIS. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 330 str.
- Šumrada, R. 2005b. Strukture podatkov in prostorske analize. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 284 str.
- Tempfli, K. 1998. Urban 3D topologic data and texture by digital photogrammetry. Proceedings of International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, American Society for Photogram. and Remote Sensing. Tampa, Florida, USA: 12 str.
- van Dam, A., Forsberg, A.S., Laidlaw, D.H., LaViola, J., Simpson, R.M. 2000. Immersive VR for Scientific Visualization: A Progress Report. IEEE Computer Graphics and Applications, IEEE Computer Society, 20, 6: 26-52.
- Vossen, G. 1991. Data models, database languages and database management systems. Wokingham, England, Addison-Wesley: 590 str.
- Watzek, K.A., Ellsworth, J.C. 1994. Perceived Scale Accuracy of Computer Visual Simulations. Wisconsin, University of Wisconsin Press, 13, 1: 21-36.
- Zakon o vodah. UL RS, št. 67-3237/2002: 7648.
- Zlatanova, S., Bandrova, T. 1998. User requirements for the third dimensionality. E-mail seminar of Cartography 1998: Maps of the future. Sofia, Bulgaria, 1: 61-72.
- Zlatanova, S. 2000. 3D GIS for Urban Development. Ph.D. dissertation. Graz, Graz University of Technology: 222 str.
- Zlatanova, S. 2002a. Augmented Reality Technology. Delft, Netherlands, TU Delft, Faculty of Civil Engineering and Geosciences: 74 str.
- Zlatanova, S., Rahman, A.A., Pilouk, M. 2002b. 3D GIS: current status and perspectives. Proceedings of the Joint Conference on Geospatial theory, Processing and Applicat., International Institute for Geo-Information Science and Earth Observ. Ottawa, Canada: 12 str.
- Zveza vodnih skupnosti Slovenije, 1978. Vodnogospodarske osnove Slovenije, Ljubljana.
- Žagar D. 1994. Tridimenzijski model za simulacijo širjenja nafte. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Podiplomski študij hidrotehnične smeri, 148 str.

- Walski, T., M. 2003. Advanced Water Distribution Modelling and Management. Waterbury, Heasted Press: 800 str.
- X3D, URL: www.web3d.org.

PRILOGE

PRILOGA A: Standard za prikaz vodnogospodarskih vsebin v kartah in načrtih DIN 2425

PRILOGA B: Simulacija obratovanja zaporničnih elementov HE Vrhovo

PRILOGA A: Standard za prikaz vodnogospodarskih vsebin v kartah in načrtih DIN 2425

Vodnogospodarske vsebine v kartah in načrtih po standardu DIN 2425 so lahko:

Hidrografija:

- Hidrografska mreža, ki jo tvorijo:
 - vodotok, reka, potok,
 - kanal in jarek,
 - slap,
 - ponikalnica,
 - ponori,
 - podzemni tok vodotoka (naravni, umetni).
- Stoječe vode:
 - jezera,
 - zadrževalniki oz. zbiralnik vode,
 - podzemne vodne tvorbe,
 - in druge stoječe vode.
- Razvodnice:
 - prispevna oz. vodozbirna območja vodotokov (posameznega reda),
 - linije vodnih (upravnih) območij.
- Erozijska in odlaganje:
 - plazovi (zemljinski, kamniti),
 - erozijska območja,
 - snežni plazovi,
 - območja odlaganja sekundarnih odkladnin (naplavišča, plazni udori).
- Izviri in vodnjaki:
 - izviri, še razpoložljivi,
 - izviri, ki že imajo uporabnika vode,
 - vodnjaki,
 - horizontalni vodnjaki,
 - nalivalni vodnjaki,
 - vode posebnih lastnosti (zdravilne, mineralne).

Hidrološki podatki in opazovanja:

- izohiete,
- črte enakih površinskih odtokov,
- črte enake evapotranspiracije,
- črte enakih nivojev podtalnice (če podtalnica teče),
- črte enakih vodostajev podtalnice (za stoječo podtalnico),

- površine, pripadajoče merilni postaji,
- pretoki (prikazana širina linij vodotoka je v sorazmerju s pretokom),
- zarast,
- pojavnost ledu:
 - na obrežju,
 - plavajoči led,
 - debela pokrovna plast ledu,
 - zaježba zaradi ledu.

Kakovost voda:

- tekoče vode: razredi kakovosti voda, glede na njihovo primernost za rabo (1 – 4. razred),
- stoječe vode: delitev glede na trofičnost (oligo-, mezo-, eu-, poli-trofne).

Ureditve in objekti za opazovanje in meritve:

- vodomerne postaje:
 - lata,
 - limnigraf z zapisom na registrator,
 - limnigraf z daljinskim sporočanjem.
- merilna mesta podzemnih voda:
 - piezometer,
 - piezometer z registratorjem,
 - za izdatnost izvirov,
 - za izdatnost z registriranjem dinamike.
- padavine in sneg:
 - totalizator,
 - enodnevna izmera, meritev padavin z najmanj enkratno dnevno izmero,
 - enodnevna izmera, z registratorjem in najmanj enkrat dnevno izmero,
 - merjenje padavin z javljalnikom,
 - merjenje padavin z avtomatskim odzivnikom,
 - merjenje padavin z daljinskim sporočanjem,

- merilno mesto za višino snega,
- merilno mesto višine vodnega stolpca, ki je ekvivalenten višini snežne odeje,
- merilno mesto višine snega in višine vodnega stolpca, ki je ekvivalenten višini snežne odeje.
- klimatske in vremenske postaje:
 - klimatska postaja,
 - klimatska postaja z regulatorjem padavin,
 - sinoptična vremenska postaja,
 - sinoptična vremenska postaja z daljinskim sporočanjem,
 - merilna mesta za infiltracijo, transpiracijo in evaporacijo:
 - o lizimeter,
 - o evaporimeter,
 - o meritev vlažnosti tal,
 - o meritev infiltracije.

Površine (območja) s pravnim režimom:

- vodovarstvena območja, ločene glede na že uveljavljene pravne režime (s sprejetim aktom) in na predvidene pravne režime,
- rezervirana območja za oskrbo z vodo,
- območja s posebnimi vodnimi znamenitostmi,
- zavarovana območja zdravilnih voda, ločene glede na že uveljavljene pravne režime in na predvidene pravne režime,
- zavarovana območja bogatenja podtalnice,
- zavarovana prispevna območja zaradi zmanjševanja vnosa škodljivih snovi s padavinskimi vodami,
- poplavna območja (zavarovana z aktom, brez akta (naravni vodni režim)),
- zadrževalniki:
 - akumulacije s pregrado,
 - mokri zadrževalniki,
 - suhi zadrževalniki,
- območja za obdelavo odpadnih voda (obstoječa, načrtovane lokacije).

Skladiščenje in transport snovi, ki ogrožajo vode:

- deponije odpadkov,
- skladišča vodi nevarnih snovi,
- daljinski transportni cevovodi.

Zajem voda:

- zajetja vode (podzemna ali površinska):
 - vodnjaki (zajeti, načrtovani, zajemni),
 - zajetja podtalnice (zajeta, načrtovana),
 - zajetje iz podtalnice z naravnim ali umetnim bogatenjem (zajeto, načrtovano),
- površinska zajetja (zajeta, načrtovana).

Objekti in naprave za oskrbo z vodo, vodnogospodarska infrastruktura in daljinski transport vode so vključene tudi v prikaz v kartah in načrtih za urejanje voda, zaščite pred visokimi vodami in zaščite obale (temelječe na vodnogospodarski strokovni dokumentaciji).

Splošni podatki:

- črta obale – obrežja (pri čemer upoštevamo, da imamo obale morja in obrežja vodotokov),
- erozijske površine,
- površine odlaganja (plavin, ipd.),
- strme brežine.

Vodna telesa:

- | | |
|----------------------------------|---|
| • tekoče vode, | • suhi zadrževalniki, |
| • stoječe vode (jezero, ribnik), | • vodotoki z grajenimi koriti, |
| • akumulacije, | • izločeni odseki voda (rokavi, mrtvice), |
| • mokri zadrževalniki, | • izločene vodne površine. |

Vodne zgradbe:

- zavarovanje brežin,
- prečne zgradbe,
- vzdolžne zgradbe,
- nasipi (povozni, manjše širine krone),
- visokovodni zaščitni zid,
- objekti v nasipu,
- dostopne rampe,
- talni pragovi,
- rečna stopnja,
- fiksni jezovi,
- jezovi z gibljivo krono (npr. zapornice, mehki jez ipd.),
- zajezna zgradba,
- pregrada,
- objekt za izkoriščanje vodne sile,
- črpališče,
- prečrpovališče,
- splavnice,
- zaklopke,
- zapornice,
- tesnitve,
- uvajalne zgradbe,
- odvzemne zgradbe,
- premostitve,
- prepusti, zacevitve,
- sifoni,
- prodne pregrade.

PRILOGA B: Simulacija obratovanja zaporničnih elementov HE Vrhovo.

Simulacija prikazuje slike preleta okoli prelivnega polja, na katerem obratujejo zapornični elementi, je prikazana z zaporedjem slik.

Slike si sledijo v zaporedju vsake vrstice in navzdol, tj. po vrstici naprej pa desno in nato na naslednjo vrstico.

