

Odtokový proces



RNDr. Jakub Langhammer, Ph.D.
Katedra fyzické geografie a
geoekologie

Obsah

- Bilanční rovnice
- Mechanismus odtokového procesu
- Základní jednotky odtoku
- Měření průtoků a vodních stavů
- Variabilita odtoku
- Hydrologické extrémny

Bilanční rovnice

$$H_s = H_o + H_v \pm H_r \pm H_u$$

roční výška
srážek

roční výška
odtoku

roční výška
výparu

změna
zásob vody
v povodí

výměna se
sousedním
povodím

Zjednodušení:

$$H_s = H_o + H_v$$

Hydrologie - odtokový proces, J. Langhammer, 2007

3

Mechanismus odtokového procesu



4

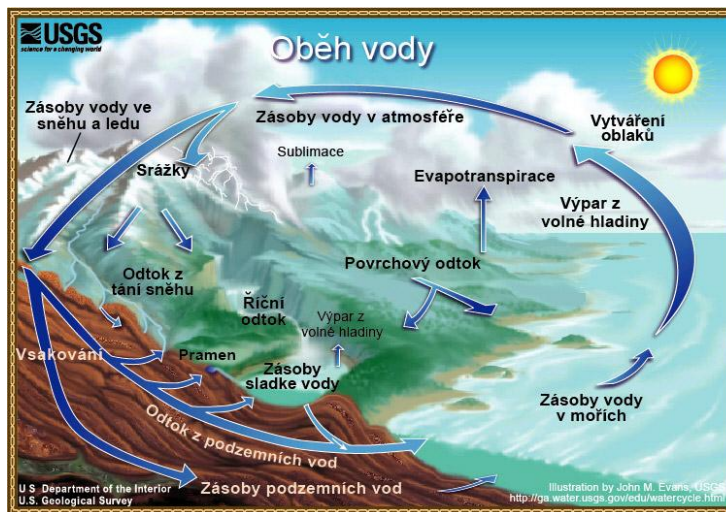
Odtok

- Kdy vzniká povrchový odtok?
 - Obecně - v důsledku překročení schopnosti krajiny pojmout vodu ze srážek.



- Základní modely odtoku
 - hortonovský
 - odtok ze saturace půdy (nehortonovský)

Odtokový proces



Podpovrchová voda

Voda ze srážek prosakuje do půdy

• Nenasycená zóna

- Voda přítomna ve spárách a pórech
- Pod povrchem, půda není nasycená vodou.
- Horní část tvoří půdní zóna – systém mezer a pórů díky rostlinám a živočichům – umožňují infiltraci, voda využívána rostlinami.



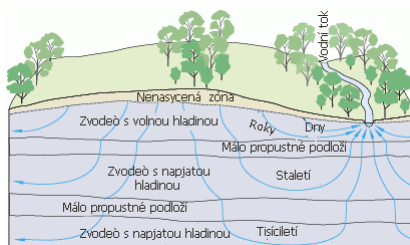
• Hladina podzemní vody

• Nasycená zóna

- Póry a spáry v půdě a hornině zcela naplněny vodou.
- Pohyb vody – průlinové a puklinové proudění

Odtok podzemní vody

- Směr a rychlost pohybu podzemní vody je ovlivněn různými charakteristikami zvodní a půdních či horninových vrstev
- Pohyb vody závisí na propustnosti (schopnosti propouštět vodu do podzemí) a pórovitosti (podílu spár a mezer na jednotkovém objemu půdy či horniny) horniny či zeminy.



Vznik povrchového odtoku

- Atmosféra
 - Srážky
- Vegetace
 - Intercepce
- Půda
 - Detence
 - Infiltrace
 - Zóna aerace
 - Hypodermální odtok
 - Zóna saturace
 - Bazální odtok
 - Povrchový odtok

Mechanismus vzniku povrchového odtoku

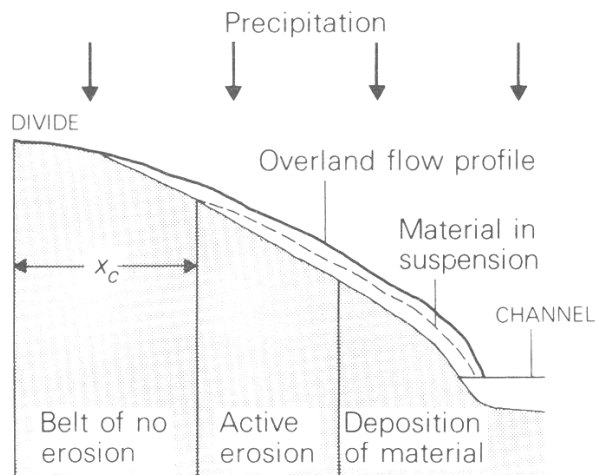
- Hortonovský odtok
- Odtok ze saturace

Hydrologie - odtokový proces, J. Langhammer, 2007

9

Hortonovský odtok

- Intenzita deště překračuje infiltrační kapacitu půdy



Hydrologie - odtokový proces, J. Langhammer, 2007

Obr.: Goudie, 1997

10

Princip hortonovského modelu odtoku

1. Intenzita deště překračuje infiltrační kapacitu půdy
2. Tenká vrstva vody se utváří na povrchu a začíná pohyb vody dolů po svahu
3. Tekoucí voda se akumuluje v povrchových depresích - detence
4. Po vyplnění deprese přetékají
5. Povrchový odtok přechází do rýh a stružek, které se spojují do toků, odtok se zrychluje, rychle roste výška hladiny v recipientu

Omezená platnost modelu

- Hortonovský odtok se vyskytuje v oblastech s vysokou intenzitou srážek, v aridních oblastech a v oblastech s tenkou vrstvou půdy s nízkou infiltrační kapacitou.
- Pozorujeme jej zejména v semiaridních oblastech s vysokými srážkovými úhrny na zemědělsky využívaných plochách.
- Kdy vzniká hortonovský povrchový odtok
 - Po lokálním překročení infiltrační kapacity půdy, voda ze srážky se hromadí na povrchu a odtéká pryč

Omezující podmínky

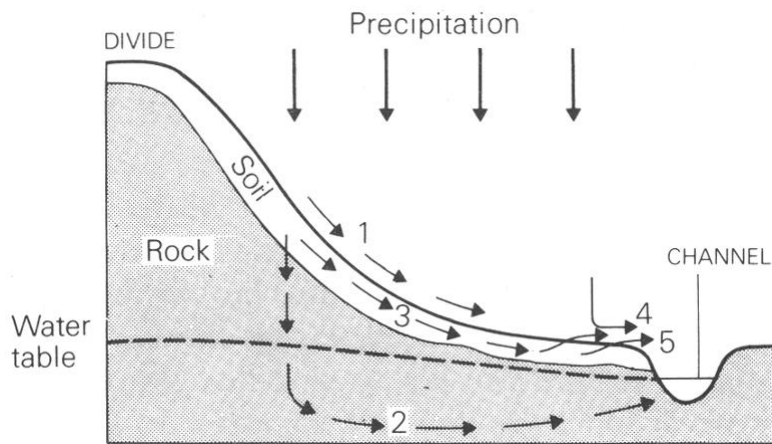
- Vysoká infiltrační kapacita půd.
 - - Na řadě míst, kde byl odtokový proces měřen, infiltrační kapacita půd vysoce překračuje intenzitu deště.
 - Např. v UK **intenzita srážek** zřídka přesahuje 20 mm/hod, dokonce i při srážkách vyvolávajících povodně.
 - **Infiltrační kapacita půdy** naproti tomu často překračuje hodnoty 200 mm/hod.
- Prostorová omezenost odtoku
 - Odtok se negeneruje na celé ploše povodí, jak předpokládá Horton, ale pouze z vybraných částí povodí.

Hydrologie - odtokový proces, J. Langhammer, 2007

13

Nehortonovský odtok - odtok ze saturace

- hlavní proces - podpovrchový odtok v půdě



Hydrologie - odtokový proces, J. Langhammer, 2007

Obr.: Goudie, 1997

14

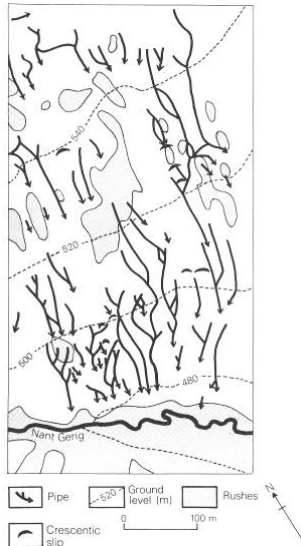
Nehortonovský odtok - odtok ze saturace

- komplexní model s obecnější platností
- hlavní proces - podpovrchový odtok v půdě
- princip nehortonovského modelu
 - závisí na stavu provlhčení půdy před, během a po dešti
 - Po vypadnutí srážek se většina vsákne do půdy a nastává podpovrchový odtok (3)
 - podél toku je na úpatí svahů malá oblast nasycené půdy. V případě, že na tuto oblast spadnou srážky, nevsáknou se, ale nastává povrchový odtok(4).
 - V průběhu srážek se zóna nasycení rozšiřuje směrem do svahu a tam, kde protíná podpovrchový odtok způsobí jeho návrat na povrch - zpětný tok (return flow, 5)
 - Po skončení srážek velmi rychle opadne přímý povrchový odtok z nasycené zóny a zpětný tok, naopak velmi pozvolna klesá podpovrchový odtok, zejména matrix flow

Odtok ze saturace

- Odtok ze saturace vyžaduje ke svému vzniku mnohem menší intenzitu srážek než hortonovský odtok.
- Je omezen na menší plochy – na místa kde při dešti může dojít k rychlému nasycení půdy.
- Zvláště důležité jsou pro vznik povrchového odtoku konkávní části svahů
 - koncentrují vodu
 - zůstávají provlhčené ještě dlouho po dešti
 - ve chvíli kdy začne znovu pršet je půda stále ještě částečně nasycená vodou.

Preferenční cesty odtoku



Hydrologie - odtokový proces, J. Langhammer, 2007

17

- Vytváření preferenčních cest podpovrchového odtoku
- Rozdílná rychlost proudění
- Ukázka – síť preferenčních cest

Rychlost odtoku v rámci různých hydrologických procesů

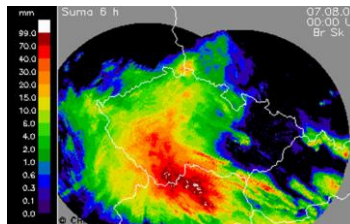
typ proudění	rozsah rychlosti (m/hod)
otevřené koryto	300-10000
povrchový odtok	50-500
pipeflow	50-500
soil matrix throughflow	0,005-0,3
podzemní proudění	
pískovec	0,001-10
jílovité břidlice	0,00000001-1
vápenec	0-500

Hydrologie - odtokový proces, J. Langhammer, 2007

18

Ovlivňující činitele odtokového procesu

- přírodní poměry



- činnost člověka



Základní veličiny odtoku

Vodní stav

- Výška hladiny nad nulou na vodočtu - pevně stanoveným bodem
- H
- Jednotky
 - cm
- Četnost odečítání
 - 7,12,18 hod.
 - zima 8,12,16 hod.

Hydromodul

- rozpětí mezi maximálním a minimálním vodním stavem

Průtok

- Q objem vody, který proteče daným průtočným profilem za jednotku času,
- Symbol Q
- Jednotky
 - l/s,
 - m³/s

Odtok

- objem vody, který odtekl z povodí za určité období, zpravidla rok
- O
- Jednotky
 - tis.m³

odtoková výška

- Ho výška vrstvy vody, kterou by odtok vytvořil na ploše povodí za dané období (rok)
- Ho
- Jednotky
 - mm

specifický odtok

- výška odtoku vztažená na jednotku plochy povodí za určitý časový úsek
- q
- Jednotky
 - m³/s/km²

výpočty

- odtok za den
 - $O = 86400 \cdot Q_d$
- odtok za měsíc
 - $O = 86400 \cdot 30,5 \cdot Q_d$
- odtok za rok
 - $O = 31,5576 \cdot 10^6 \cdot Q_d$
- odtoková výška
 - $H_o = O/P$
- roční specifický odtok
 - $q_r = h_o / (31,536 \cdot 10^6)$

Měření průtoku

Měření průtoku

- Přímé měření průtoku
 - Experimentální měření
 - Kalibrace
 - Malé vodní toky
- Měření vodního stavu a následné odvození průtoku
 - Monitoring



Hydrologie - odtokový proces, J. Langhammer, 2007

29

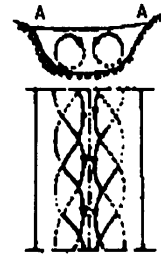
Přímé měření Q

Metody měření:

- Kalibrované nádoby
- Hydrometrická vrtule
- Plováková metoda
- Chemická - stanovení rozdílů koncentrací
- Měrné přelivy

Využití

- Experimentální měření
- Kalibrace monitoringu
- Měření v mimořádných podmínkách



Proudění v přímém úseku koryta

Hydrologie - odtokový proces, J. Langhammer, 2007

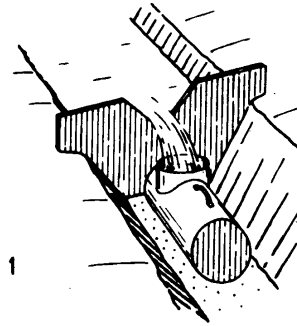
30

Přímé měření průtoku kalibrované nádoby

- Kalibrované nádoby

$$Q = V/t$$

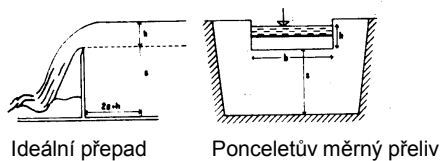
kde V objem
 t čas



Přímé měření průtoku měrné přelivy

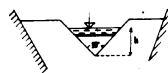
Měrné přelivy

- potoky s širokým korytem a malými hloubkami
- umístění přepadové stěny
- voda přetéká výřezem ve stěně papskem
- průtok je odvozený z výšky přepadajícího paprsku vody podle daného vzorce
- různé tvary přepadů



Ideální přepad

Ponceletův měrný přeliv



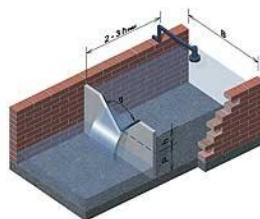
Thompsonův měrný přeliv



Trojúhelníkový přeliv

Thompsonův přeliv

- Použití na lokalitách s velkým rozsahem průtoků
- S lineárně rostoucí přepadovou výškou roste kvadraticky průtočná plocha
- **Vzorec konzumční křivky**
 - $Q = a \cdot h^{2,5}$.
- Přeliv je zvýšeně citlivý na změnu hloubky. - nezbytné používat přesné elektronické vyhodnocovače.
- Radí se mezi nejpřesnější průtokoměry.



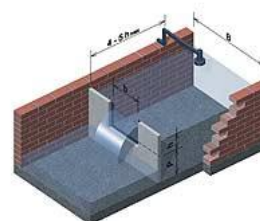
Hydrologie - odtokový proces, J. Langhammer, 2007

33

Obdélníkový přeliv

Ponceletův přeliv

- Použití na lokalitách s vyrovnaným rozsahem průtoků
- S lineárně rostoucí přepadovou výškou roste lineárně průtočná plocha
- **Vzorec konzumční křivky**
 - $Q = a \cdot h^{1,5}$
- Přeliv je přiměřeně citlivý na změnu hloubky.
- Možno používat i s méně přesnými hladinoměry.



Hydrologie - odtokový proces, J. Langhammer, 2007

34

Přímé měření průtoku hydrometrická vrtule

- Přímé měření rychlosti proudění vody v korytě
- Hydrometrická vrtule
- Záměra plochy průtočného profilu
- Princip stanovení Q

$$Q = F \cdot v_s$$



Hydrologie - odtokový proces, J. Langhammer, 2007

35

Přímé měření průtoku hydrometrická vrtule

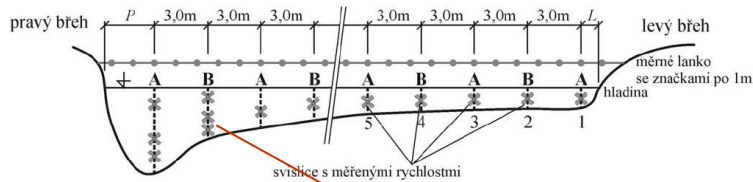
- **Výběr vhodného profilu**
 - pravidelný tvar průtočného profilu
 - koryto nerozdělené na ramena,
 - Koryto bez překážek
 - přímý úsek vodního toku
 - mimo dosah vzdutí hladiny
 - snadný přístup pozorovatele



Hydrologie - odtokový proces, J. Langhammer

Přímé měření průtoku hydrometrická vrtule

Měrné svislice



šířka toku B [m]	počet měrných svislic
$B < 0,5$	3
$0,5 < B < 1,0$	4 - 5
$1,0 < B < 3,0$	5 - 8
$3,0 < B < 6,0$	8 - 12
$B > 6,0$	12 a více

**Počet měrných bodů ve svislici
a jejich výška nade dnem:**

1 bod 0,4h
2 body 0,2h 0,8h
3 body 0,2h 0,4h 0,8h
5 bodů dno 0,2h 0,4h 0,8h hladina

J. Langhammer, 2007

37

Přímé měření průtoku hydrometrická vrtule

Měrné body ve svislici

Hloubka y [m]	počet bodů
$y < 0,25$	1
$0,25 < y < 0,50$	2
$y > 0,5$	3 a více

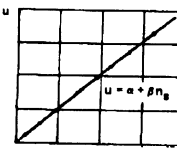
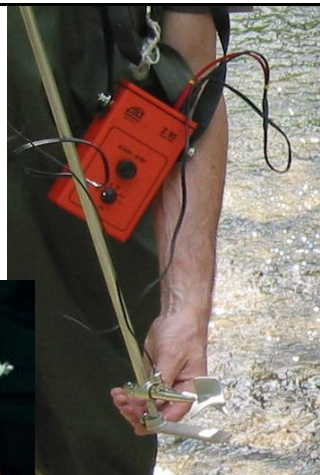
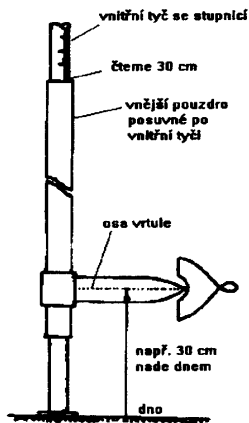


**Počet měrných bodů ve svislici
a jejich výška nade dnem:**

1 bod 0,4h
2 body 0,2h - 0,8h
3 body 0,2h - 0,4h - 0,8h
5 bodů dno - 0,2h - 0,4h - 0,8h - hladina

38

Hydrometrická vrtule



$$v = a + b \cdot n$$

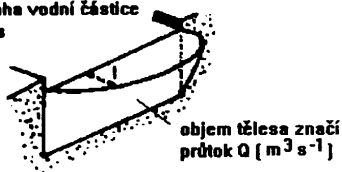
kde v ... průt. rychlost
 a, b ... koef. tření

ogie - odtokový proces, J. Langhammer, 2007

39

Model průtoku

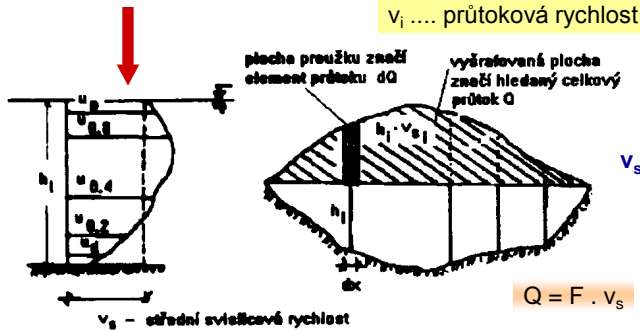
l - dráha vodní částice za 1 s



$$Q = S (F_i \cdot v_i)$$

Výpočet průtoku: 1) početní metodou
 2) grafickou metodou

B_i ... šířka úseku
 h_i ... hloubka svislice
 F_i ... dílčí plocha
 v_i ... průtoková rychlost ve svislici



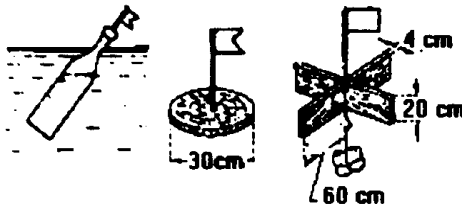
40

Přímé měření průtoku

3) Měření plováky:

- měření povrchových rychlostí
- předpoklad: plovák se v proudu vody pohybuje rychlostí okolních částic vody
- menší přesnost, nutno alespoň 3 x opakovat na vymezeném úseku
- délka úseku 5- 10 m (minimálně 10 s)

$$v_s = (v_1 + v_2 + v_3) / 3$$
$$Q = F \cdot v_s$$



7

41

Přímé měření průtoku

5) Chemická tzv. směšovací metoda - stanovení rozdílů koncentrací

- Horské potoky, kde není možno použít jiné metody
- Krasové oblasti

Princip:

- Chemický roztok známé koncentrace, přidáný rovnoměrně do vody, se rozředí

úměrně s průtokem, stupeň zředění roztoku je i mírou množství rozpouštědla,

tj. protékající vody

- důležité promísení indikované látky - turbulentní proudění

$$Q_2 = (Q_1 \cdot k_1) / k_2$$

Q_2 průtok vody
 Q_1 průtok chemického roztoku
 k_1 počáteční koncentrace roztoku
 k_2 koncentrace zředěného roztoku

Hydrologie - odtokový proces, J. Langhammer, 2007

42



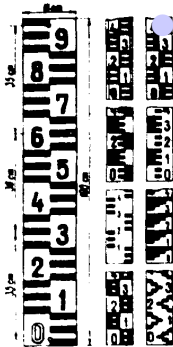
Monitoring vodních stavů

Měření vodních stavů

- Vodočet
 - Zařízení na odměřování výšky hladiny

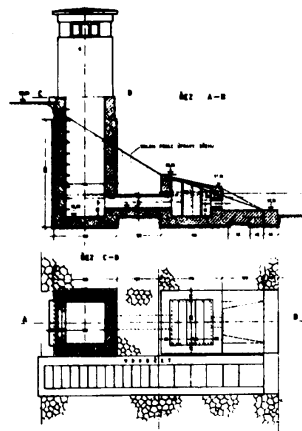
Různá konstrukce

- Laťový
- Svahový aj.



Limnigraf

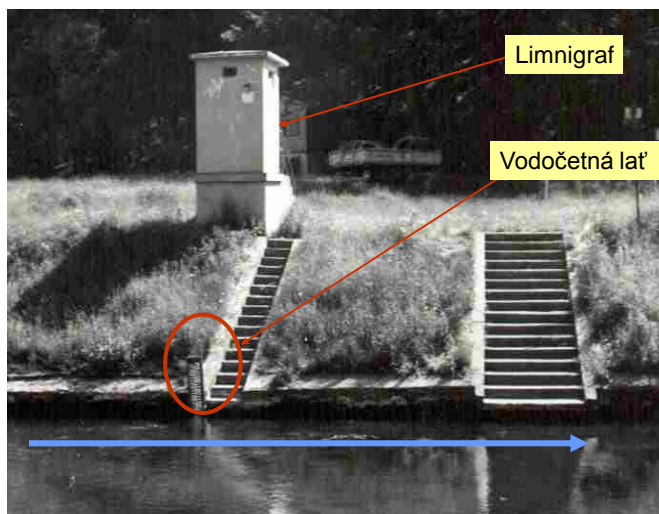
- Zařízení pro automatický záznam vodních stavů
- Zákres průběhu vodních stavů v čase
- Výstup – limnigram
- Uspořádání limnigrafu:
 - spodní stavba s přívodním kanálem
 - plováková šachta
 - budka
 - vodočet



Hydrologie - odtokový proces, J. Langhammer, 2007

45

Měrná stanice



Hydrologie - odtokový proces, J. Langhammer, 2007

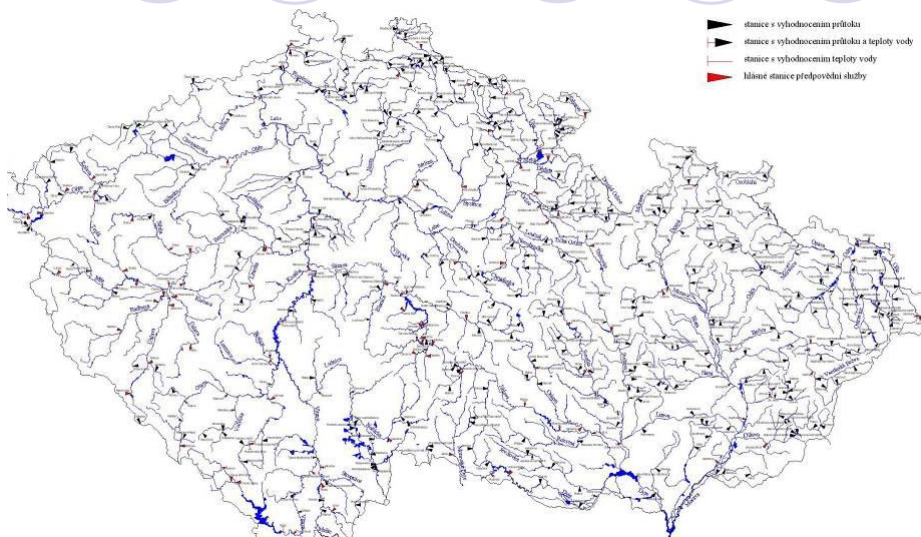
46

Sít' měrných stanic ČHMÚ

● Celkový počet stanic 496

- pozorujících vodní stav 484
- pozorujících teplotu vody 149
- pozorujících plaveniny 44
- hlásné profily 154

Měřicí stanice povrchových vod v ČR





- stanice Vltava - Lenora



Hydrologie - odtokový proces, J. Langhammer, 2007

49



- Stanice Ohře - Cheb

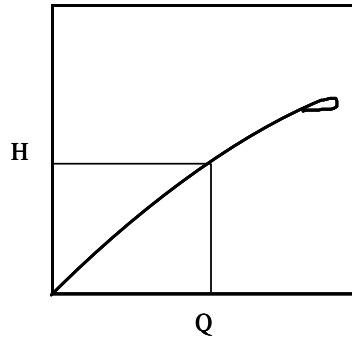


Hydrologie - odtokový proces, J. Langhammer, 2007

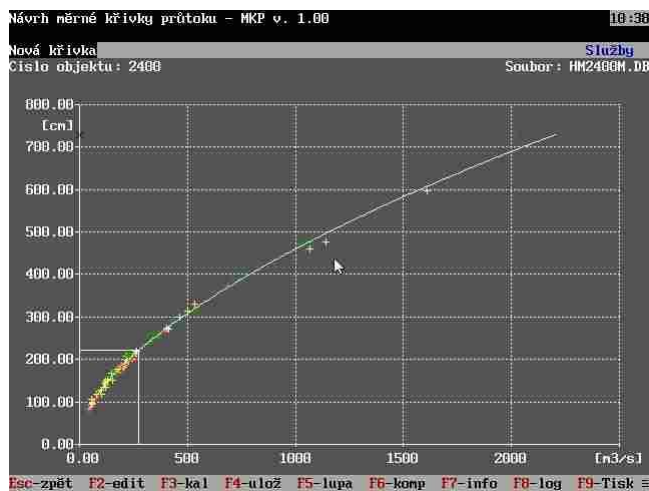
50

Konsumpční křivka

- Q-h relace
- Závislost mezi vodním stavem a průtokem
- Měření vodního stavu
 - Limnigraf
 - Vodočet
- Nejednoznačný průběh konsumpční křivky



Měrná křivka



Moderní a experimentální metody měření vodního stavu a průtoku

- Nové metody snímání

- Ultrazvukový hladinoměr
- Tlakové čidlo



- Digitální záznam a přenos dat

- Datalogger
- Telemetrický přenos dat - GPRS



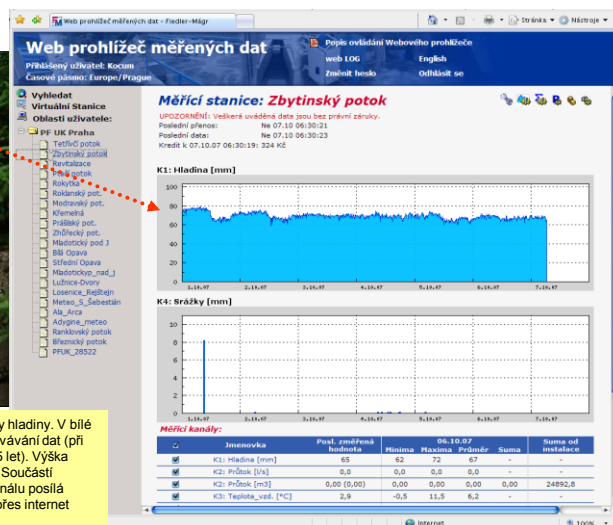
Hydrologie - odtokový proces, J. Langhammer, 2007

53

Ultrazvukový hladinoměr s telemetrickým přenosem dat



Detail ultrazvukového čidla na měření výšky hladiny. V bílé krabici je umístěn dataloger na sběr a uchování dat (při intervalu měření 1 min. je kapacita paměti 5 let). Výška hladiny je měřena v intervalu jedné minuty. Součástí modulu je i zařízení, které pomocí GSM signálu posílá naměřená data na server, ze kterého jsou přes internet dostupná na našem pracovišti.



Ultrazvukový hladinoměr s telemetrickým přenosem dat

- Registrační a měřící jednotka Fiedler – Mágr M4016 s ultrazvukovým čidlem a GSM modulem pro přenos dat sítí GPRS.
- Vysoká přesnost měření (1 mm), možnost kontinuálního měření v intervalu 1 minuta, možnost zaslání varovných sms zpráv v případě překročení libovolně nastavené úrovně hladiny.
- U některých stanic je instalován i člunkový srážkoměr (přesnost měření 0,1 mm). Instalované hladinoměry a srážkoměry vhodně zahušťují stávající síť provozovanou ČHMÚ a správou NP Šumava



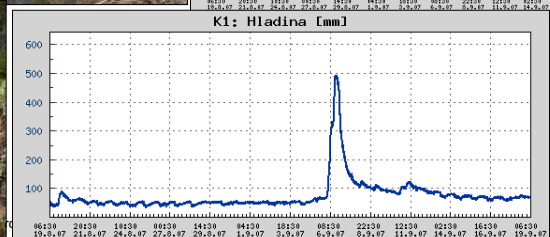
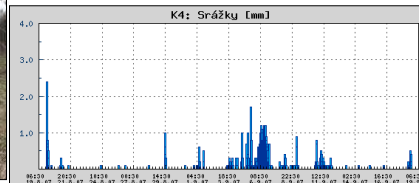
Instalace Hladinoměru

Hydrologie - odtokový proces, J. Langhammer, 2007

55

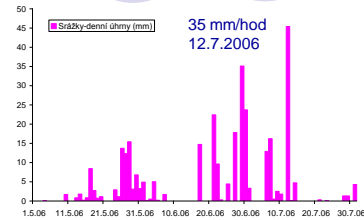
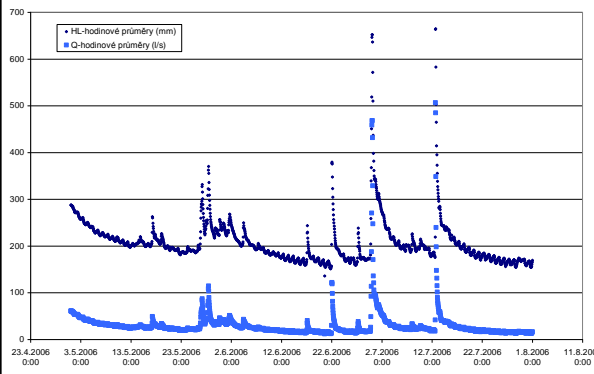
Ultrazvukový hladinoměr a srážkoměr telemetrickým přenosem dat

- Monitoring srážek a odtoku založek na 3 mikropovodích na horním povodí Blanice u lokality Zbytiny



Zbytiny - povodeň červenec 2006

Tetřivčí potok



Literatura

- Chow, Ven Te (1959): Open-Channel Hydraulics. McGraw-Hill
- Goudie, A. (1993): The Nature of the Environment. Oxford: Blackwell Publishers.
- Kemel, M. (1994): Hydrologie. Praha: Vydavatelství ČVUT.
- Netopil, R. a kol. (1984): Fyzická geografie 1. SPN, Praha.
- Netopil, R. (1970): Základy hydrologie povrchových a podpovrchových vod. SPN, Praha.
- Strahler, A., Strahler, A. (2000): Introducing Physical Geography. Wiley, New York.