# INOVATIVNÍ TECHNOLOGIE ZHUTŇOVÁNÍ A ŘÍDICÍ SYSTÉMY ZHUTŇOVÁNÍ PRO OBNOVU PROTIPOVODŇOVÝCH HRÁZÍ

**Dietmar Adam, Marek Szabo**[6)]

**Anotace**

Protipovodňové ochraně je připisována významná celospolečenská důležitost. Protipovodňová opatření chrání velké množství soukromého a státního majetku. Katastrofální povodně posledních desetiletí demonstrovaly možný rozsah škod, které povodně mohou způsobit. Obor geotechnika svými poznatky významně přispívá ke spolehlivosti protipovodňových hrází. V Rakousku proběhlo rozsáhlé přepracování technických požadavků na ochranné konstrukce. Současně byly rozvinuty inovativní postupy výstavby a hutnění zemních konstrukcí, které vylepšují stávající, novým standardům již nevyhovující protipovodňové hráze.

## Úvod

Katastrofální záplavy v posledních desetiletích svědčí o tom, že je stav četných protipovodňových hrází v mnoha regionech v Rakousku a v sousedních zemích nedostatečný. Četné škody ukázaly, že je nezbytné dosáhnout vysoké stability a funkčnosti hrází a zejména dočasně namáhaných protipovodňových náspů (*obr. 1*).

*Obr. 1* Protržení hráze na řece Aist v roce 2002 (vlevo) a při povodni na řece Moravě v roce 2006 (vpravo) [7]

Ve většině případů je jejich neuspokojivý současný stav důsledkem historického vývoje provádění protipovodňových opatření. Výstavba těchto zemních protipovodňových konstrukcí byla provedena s použitím velmi jednoduchých prostředků. To znamená, že zejména starší hráze a protipovodňové náspy představují vysoké riziko selhání při příští povodni. Byly často

6) Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Adam, Institute of Geotechnics, Vienna University of Technology, Karlsplatz 13/220-2, A-1040 Wien, e-mail: dietmar.adam@tuwien.ac.at

Dipl.-Ing. Marek Szabo, Institute of Geotechnics, Vienna University of Technology, Karlsplatz 13/220-2, A-1040 Wien, e-mail: szabo@tuwien.ac.at

budovány jako zemní náspy s nepropustným jádrem, ale zpravidla z homogenního sypaného materiálu. Tento výplňový materiál se získával v přilehlé oblasti (údolní niva) a často obsahoval různé druhy zemin. V tomto případě mají tyto „homogenní" náspy částečně heterogenní zóny a vysoce proměnlivou propustnost. Kvůli nedostatečnému zhutnění materiálu zemní výplně a vysoké propustnosti může i při menších povodních docházet k změkčování anebo uvolňování výplňového materiálu. Podle délky zatížení pak může dojít k selhání protipovodňového ochranného náspu. Na základě těchto poznatků by mělo být cílem obnovy hrází vybudování náspu z dobře zhutněného výplňového materiálu s nízkou propustností. Optimalizace procesu rekonstrukce vyžaduje nové postupy zhutňování.

Tyto inovativní technologie zhutňování, jako jsou automaticky řízené vibrační válce s polygonálním bubnem válcem pro povrchové zhutnění a rázové zhutnění pro středně hluboké zhutnění, byly při sanačních pracích na hrázích poprvé použity v Rakousku. Tyto metody zhutňování byly nejprve použity na hrázích Dunaje a jeho přítoků, a to na řekách Morava [3] a Kamp [4].

## Protipovodňové hráze

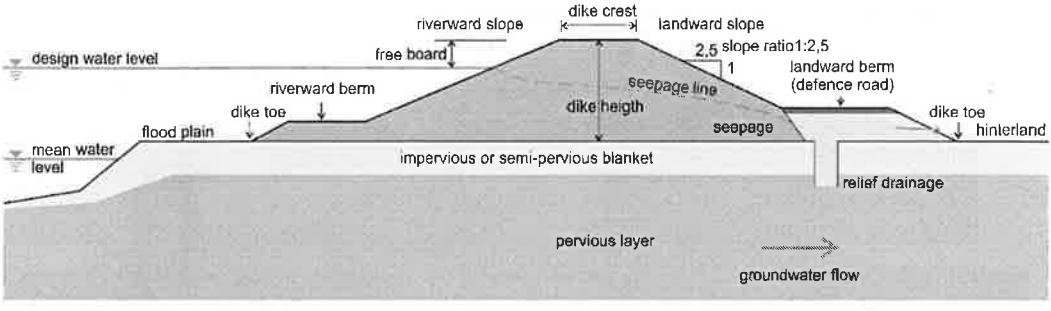
### Specifikace a požadavky na moderní protipovodňové hráze

Povodňové události v posledních desetiletích ukázaly vysoké riziko selhání starších protipovodňových staveb. V mnoha případech nesplňují současné technologické požadavky a jejich geometrie je většinou nedostatečná. Z tohoto důvodu je třeba provést sanaci či zlepšení statické a hydraulické funkčnosti protipovodňových staveb, aby odolaly pravidelnému povodňovému zatížení [10], [11].

Konstrukce protipovodňových hrází a náspů vyžaduje především individuální přizpůsobení technických opatření podle geotechnických, hydraulických a místních podmínek, aby byla zajištěna maximální ochrana území. Rekonstrukce musí vzít v úvahu také údaje o povodních, možná rizika a další aspekty protipovodňové ochrany. Při tak široké řadě různých aspektů je každý projekt jedinečný. Není možné pro provedení hráze používat jednotné a standardizované průřezy. Na druhou stranu musí každý projekt splňovat určité bezpečnostní normy a kritéria kvality. Ze zkušeností z posledních let byly odvozeny následující technické požadavky, týkající se hydraulických a statických podmínek [15]:

- **Násep** musí být stabilní, vytvořený z výplňového materiálu s nízkou propustností, zhutněného podle současných norem a postupů.
- **Těsnicí systém** poskytuje ochranu proti erozi a hydraulickou ochranu. Systémy těsnicího jádra (tenké těsnicí stěny, těsnicí stěny, stěny lité na místě atd.), které jsou zakotveny v náspu, mají mnoho výhod oproti povrchovému utěsnění. Co se týče zachování pohybu podzemních vod, zabránění jejich průtoku je nepřípustné, případně vzhledem k tloušťce propustných vrstev nemožné. V těchto případech lze jen instalovat ne zcela nepropustné stěny, které umožňují prosakování pod hrází.
- **Pomocná drenáž** u paty náspu směrem k chráněnému území pomáhá lepší kontrole průsaku vody podložím. Bez zmírnění vysokého hydrostatického tlaku pod nepropustnou vrstvou by nekontrolovaný vznik trhliny v důsledku tlaku vedl k poškození přehrady. Když jsou základové vrstvy heterogenní nebo chybí nepropustná vrstva, snižuje se hydraulický gradient odlehčovacími vrty nebo pomocnými drenážemi, čímž se omezuje eroze kvůli prosakování v rizikových místech.
- **Ochranná hrázka** stabilizuje svah hráze u paty směrem k chráněnému území a může se také využívat jako zásahová silnice pro lepší přístup během povodní. Pomáhá také při odstraňování případné eroze horních vrstev z citlivé oblasti paty hráze.

Geometrie profilu a konstrukce náspu (*obr. 2*) má přímý vliv na jeho stabilitu. V průřezu musí být zajištěno dostatečné převýšení koruny hráze s ohledem na hladinu vysoké vody. Převýšení koruny hráze chrání sypanou zemní hráz před přelitím, a to především v důsledku vln vznikajících působením větru. Minimální šíře koruny hráze 3 m nabízí dostatek místa pro protipovodňový zásah a umožňuje přístup vozidel během záplav. Svahy by měly být navrženy co nejvíce ploché (maximální poměr sklonu 1 : 2), aby se zajistila jejich maximální stabilita. Dalším opatřením pro zajištění stability je zásahová komunikace na patě náspu směrem k chráněnému území, která umožňuje rychlý přístup při mimořádných událostech.




*Obr. 2* Průřez protipovodňové hráze; obecné definice

Obecně platí, že geometrie hráze závisí zejména na uvažované hladině vysoké vody a jejím hydraulickém zatížení. Kromě toho jsou důležité mechanické vlastnosti výplňového materiálu a podloží, jakož i místní podmínky.

**Typická konstrukce a složení protipovodňových hrází**

Každá nová nebo rekonstruovaná protipovodňová hráz musí poskytovat dostatečnou ochranu území bez ohledu na typ konstrukce. Průřez musí být navržen tak, aby odolal extrémním povodním a eliminoval jakékoliv problémy se stabilitou. Konstrukce hráze vychází z geotechnických, hydraulických a místních parametrů. Proto bylo v posledních desetiletích vytvořeno množství různých typů hrází:

**Hráze bez těsnicího systému** jsou budovány pouze jako homogenní násep se statickou a hydraulickou funkcí. Takové hráze byly stavěny zejména v posledních desetiletích. U starších hrází se velmi často používal heterogenní výplňový materiál s různou propustností. Z tohoto důvodu se při sanačních pracích přidává další těsnicí stěna, aby byla vybudována zónová hráz.

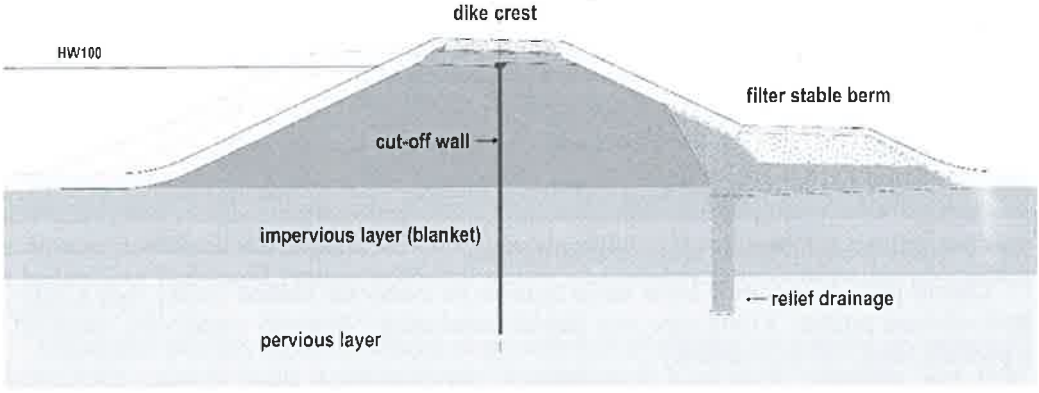
**Zónové hráze** jsou homogenní náspy s těsněním, které může být instalováno jako vodotěsná povrchová vrstva nebo jako vnitřní jádro. U tohoto typu hrází má násep statickou funkci a těsnění funguje jako hydraulická a protierozní ochrana. V posledních 20 až 30 letech nahrazují hráze s povrchovým těsněním hráze s jádrovým těsněním. Ve srovnání s povrchovým těsněním je vnitřní jádro stabilnější vůči vnějším zásahům (např. vandalismu), nebrání pohybu osob, zvířat atd. po svahu a také je vizuálně skryto.

Nepropustné jádro je zakotveno v náspu a probíhá podél podélné osy přehrady. Může být zhotoveno z různých materiálů pomocí různých metod. Materiál musí splňovat požadavky na propustnost a erozi. Vhodnými materiály jsou přírodní jemnozrnné zeminy, cementobentonitové směsi, beton, ocel či vinyl atd.

Zvláště vhodné je provedení stěn uvnitř hrází a náspů formou tenkých těsnicích stěn (stěny z vibrované cementové kaše). Jsou velmi úsporné, mohou být zhotoveny velmi rychle a vyža-

dují jen malý pracovní prostor. Kromě toho kompenzují nižší kvalitu výplňového materiálu půdní struktury. Vzhledem k jejich tloušťce jen ≥ 7 cm se jejich statický vliv v analýze stability z bezpečnostních důvodů nezohledňuje.

V případě, že těsnicí stěny mají plnit i statickou funkci, používají se různé metody. Pro tento účel se doporučuje vybudování těsnicích stěn, štětových stěn nebo stěn litých na místě. Větší tloušťka anebo vyšší tuhost stěny zaručují lepší přenos svislého a vodorovného zatížení tlaku vody a země. Vzhledem k vodorovnému uložení náspu nevyžadují svislé těsnicí stěny ze statického hlediska zapuštění. Délka zapuštění do propustné vrstvy ovlivňuje stabilitu podkladu vůči erozi. Rozšířením průsakové dráhy se snižuje riziko vyplavování a vnitřní eroze. *Obr. 3* ukazuje standardní průřez na řece Moravě v Rakousku.

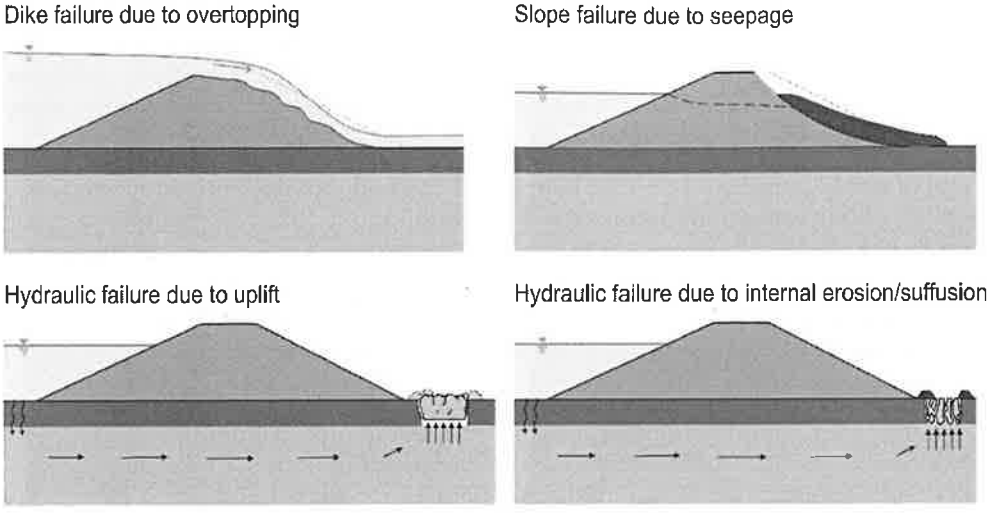



*Obr. 3* Standardní průřez hráze na řece Moravě (via donau, 2009)

**Mechanismy selhání**

Selhání protipovodňových hrází jsou většinou způsobena nežádoucími vertikálními a horizontálními pohyby v důsledku hydraulického zatížení při povodních. Pokud jsou náspy ve špatném stavu, hydrostatické a hydrodynamické síly působící na jejich těleso mohou snadno způsobit ztrátu stability. To platí zejména pro starší hráze a náspy. Jsou často vystavěny z heterogenního materiálu s nedostatečným zhutněním. Nízký stupeň zhutnění v kombinaci s nevhodnou nebo nespojitou zrnitostí výplňového materiálu vytváří ideální podmínky pro vznik vnitřní eroze, způsobené prosakující vodou nebo pro narušení svahu. Oba mechanismy vedou k oslabení náspu. V takových případech může již velmi malé hydraulické zatížení způsobit selhání přehrady.

Znalost možných mechanismů selhání je základním předpokladem pro spolehlivé posouzení kvality stávajících hrází a náspu a pro optimalizovanou konstrukci nových hrází a sanační práce. Kromě toho pomáhá při optimalizaci nouzových opatření při protipovodňovém zásahu.




*Obr. 4* Různé mechanismy selhání hráze z hydraulických příčin (přelití, prosakování přes násep a průsak podložím)

Hlavní mechanismy selhání (*obr. 4*) při obvyklých půdních podmínkách podél řek (přípovrchové písčité až jílovité naplaveniny s nízkou propustností na písku nebo štěrku s vysokou propustností) jsou [12]:

- přelití nebo přetékání koruny hráze;
- hydraulické narušení;
- povrchová eroze a narušení svahu na straně vody působením vln;
- vyplavování materiálu v důsledku činnosti zvířat, zejména bobrů či potkanů;
- narušení svahu kvůli nadměrnému tlaku vody, prosakování nebo vnitřní erozi;
- narušení svahu v důsledku prudkého poklesu hladiny záplavové vody;
- nevhodné osazení hrází zelení (zejména stromy s plochým kořenovým systémem).

Ve skutečnosti je často obtížné přesně určit příčinu selhání přehrady. Na selhání hráze může mít vliv několik různých druhů procesů a mechanismů. Statistické analýzy ukazují, že nejčastější způsoby selhání jsou přelití a vnitřní eroze hráze.

Z geotechnického hlediska lze riziko selhání minimalizovat vhodným výběrem výplně a jejího půdního mechanického chování, jakož i provedením správných technických opatření. Proto by měl být kladen důraz na metodu zhutnění, která má přímý vliv na propustnost a smykovou pevnost výplně. Je také důležité zajistit dostupnost materiálu před zahájením prací na místě stavby.

**Koncepce sanačních prací**

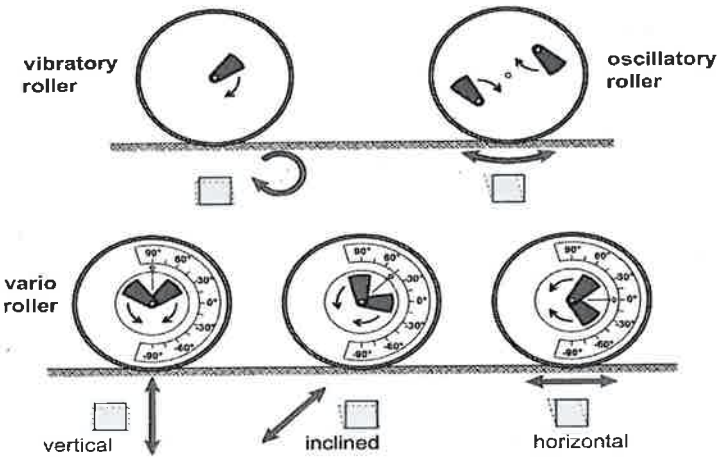
Hlavním cílem sanace hrází nebo protipovodňových náspů je udržet nebo opravit/obnovit stabilitu konstrukce a v některých případech zvýšit původní úroveň koruny pro dosažení stanovené úrovně ochrany. Tyto práce musí být zaměřeny rovněž na hydrodynamickou stabilitu náspu. Kromě dobře fungujícího těsnicího systému je nutno vzít v úvahu i filtrační a drenážní systém.

Důležitou roli při sanaci hrází hraje technologie povrchového a středně hlubokého zhutňování. V důsledku snížení poměru pórů výplňového materiálu se značně sníží propustnost a zvýší se smyková pevnost a stabilita náspu. Opakované zkoušky zhutňování a několik výzkumných studií prokázaly, že optimalizace sanačních prací lze úspěšně dosáhnout přizpůsobením postupu hutnění daným podmínkám na místě stavby. Případové studie uvedené v této práci dokazují technické a ekonomické výhody použití těchto inovativních metod hutnění.

## Zhutňování válcováním a řízení integrované ve válci

### Zhutňování válcováním

Povrchové zhutnění se obvykle provádí staticky nebo dynamicky pomocí vibračních či oscilačních válců, nebo válců s řízenou excitací, tzv. VARIO válců. Různé druhy excitací jsou uvedeny na *obr. 5*. Již několik let se používají také inovativní automatické („inteligentní") válce (VARIOCONTROL, ACE) [2].




*Obr. 5* Dynamický válec a různé druhy excitace (typy bubnu)

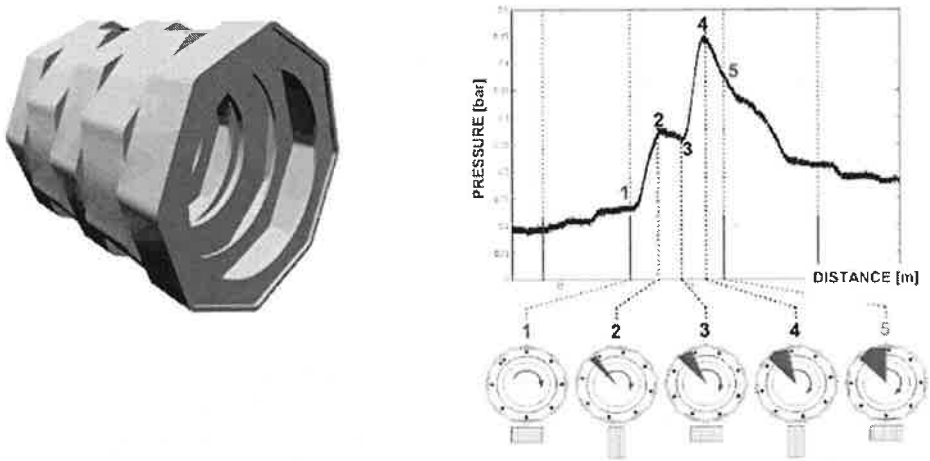
### Vibrační válce, válce VARIO a VARIOCONTROL s polygonálním bubnem

V současnosti se pro zemní práce používají zejména vibrační, ručně ovládané válce VARIO a automatické válce VARIOCONTROL. Tyto způsoby zhutňování umožňují lepší zhutnění díky interakci mezi dynamickými silami a statickým zatížením vlastní hmotnosti bubnu. Kromě toho hrají velmi důležitou roli pro dosažení dostatečného zhutnění strojní parametry válce a také mechanické vlastnosti půdy. Zejména při zhutňování jemnozrnných soudržných zemin, které se používají jako výplňový materiál pro hráze především, je dynamické zhutňování válcováním omezeno na určité půdní parametry. To znamená, že vibrace bubnu vytvářejí při vyšším obsahu vody soudržných zemin přebytek tlaku pórové vody. Nemohou jej uvolnit přímo, vzhledem k nízké propustnosti půdy, a způsobují tak změnu konzistence a zhoršení hodnot hutnění. Toto zhoršení může být částečně omezeno přizpůsobením tvaru bubnu pro lepší zhutnění jemnozrnných zemin. Tato inovativní technologie hutnění pomocí vibračního válce s polygonálním bubnem byla použita pro optimalizaci zhutnění při sanačních pracích na protipovodňových hrázích na řece Moravě.

*Obr. 6* Válec VARIOCONTROL s polygonálním bubnem (vlevo) a vibrační válec s běžným hladkým bubnem (vpravo)

Polygonální buben (*obr. 6*) představuje ve srovnání s běžným hladkým či ježkovitým bubnem zlepšení díky upravenému tvaru bubnu (*obr. 6*). Buben se skládá ze tří osmibokých částí, které jsou umístěny vedle sebe v axiálním směru a jsou nastaveny odstupňovaně. Na obou vnějších okrajích bubnu jsou přivařeny kroužky pro lepší řízení a přepravu na tvrdých površích [13].

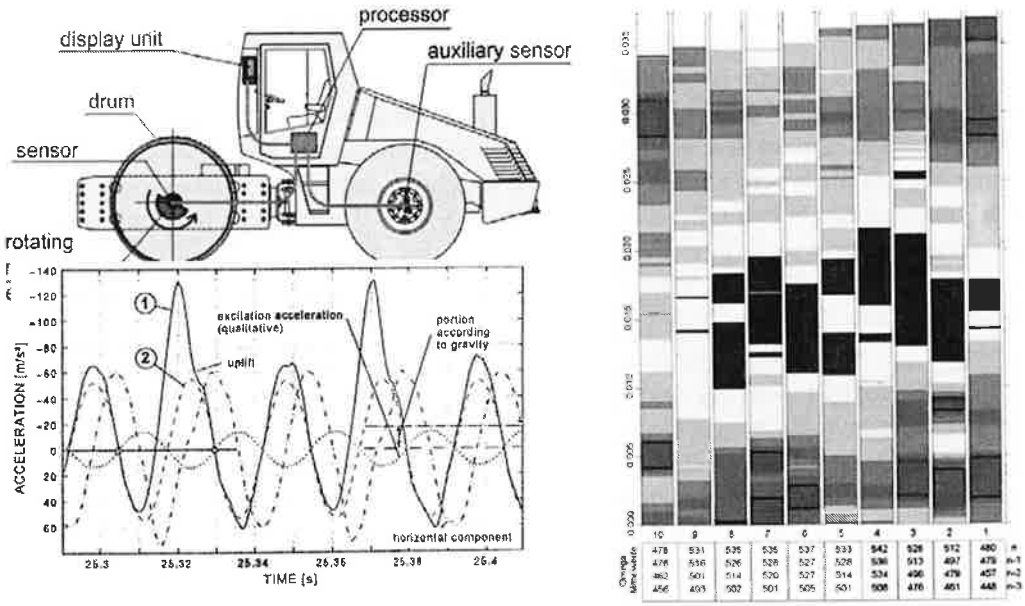
Během hutnění vyvolává buben polygonálního tvaru neustále se měnící síly mezi plochými částmi a hranami jednotlivých osmihranných prvků (*obr. 7*). Když plochá část spočívá na zemi, jsou přenášeny pouze běžné, ale žádné smykové síly, čímž se zajišťuje požadované zhutnění vrstvy zeminy. Zároveň jsou smykové síly vyvolávány pronikáním hran sousedních prvků do země, což způsobuje pohyb vpřed. Kromě toho mají hrany bubnu velký vliv na výsledek zhutnění polygonálním bubnem. Když hrany vyvíjejí nejvyšší tlak v kontaktní linii mezi bubnem a zhutněnou vrstvou zeminy (v závislosti na její poloze), následné pronikání hrany do země vytváří oddělené tahové síly, které způsobují boční posun částic zeminy. Než plochy (ploché části) opět zatlačí na zem, bočně posunuté částice zeminy se mohou uvolnit kolem hran. V okamžiku, kdy vedlejší plochy dosednou na zem, dojde k novému rozdělení působících sil. Dále pak rozdělené tažné síly vyvíjejí smykové síly, které jsou důležité zejména pro zhutnění jemnozrnné soudržné zeminy [13].




*Obr. 7* Polygonální buben. Optimální zhutňování jemnozrnné zeminy pro uvolnění tlaku pórové vody změnou kontaktního tlaku zeminy („hnětení")

**Průběžná kontrola hutnění (CCC)**

Průběžná kontrola hutnění (CCC) integrovaná do válce, zajišťuje kompletní hodnocení kvality zhutnění a záznam po každém průjezdu válce. Touto metodou se zaznamenává interakce mezi bubnem a zeminou a je standardním příslušenstvím většiny vibračních válců.




*Obr. 8* Princip CCC: Součásti CCC; hodnoty CCC se odvodí z měřeného zrychlení bubnu a zobrazená plocha území zahrnuje rozdělení hodnot CCC [2]

Průběžná kontrola hutnění (CCC) integrovaná do válce, představuje významné zlepšení; je založena na měření dynamické interakce mezi dynamickými válci a zeminou [1]. Pohyb různých dynamicky excitovaných bubnů válce se mění v závislosti na reakci zeminy. Této skutečnosti se využívá ke stanovení tuhosti povrchu. V souladu s tím se buben dynamického válce používá jako měřicí přístroj; jeho pohyb se zaznamenává, analyzuje v procesorové jednotce, kde se vypočítá hodnota dynamického zhutnění, a pak se zobrazí na číselníku nebo na displeji, kde lze údaje také ukládat. Dále je zapotřebí pomocný senzor pro stanovení polohy válce, případně může být zajištěna lokalizace pomocí GPS. Kontrolní údaje jsou k dispozici již v průběhu zhutňování, a to pro celou plochu zhutňování (*obr. 8*).

Jsou k dispozici čtyři záznamové systémy pro vibrační válce a válce VARIO s vertikálním nebo nakloněným směrem excitace (kromě vodorovného směru), viz *tab. 1*. Všechny systémy mají senzor, který obsahuje jeden nebo dva akcelerometry připojené k ložisku bubnu válce, procesorovou jednotku a displej pro zobrazení naměřených hodnot. Senzor nepřetržitě zaznamenává zrychlení bubnu. Časový průběh signálu zrychlení se analyzuje v procesorové jednotce, aby se zjistily hodnoty dynamického zhutnění s ohledem na stanovené parametry válce.

*Tab. 1* Systémy CCC, hodnoty CCC a jejich definice; výrobci

| Systém CCC | Hodnota CCC | Definice hodnoty CCC | Výrobce |
|---|---|---|---|
| Kompaktometr | **CMV** [ ] | poměr amplitudy zrychlení (první harmonické rozdělení excitační frekvenční amplitudou) – **frekvenční doména** | Geodynamik, Švédsko |
| Terrametr | **OMEGA** [Nm] | energie přenesená do zeminy (vztah kontaktní síly zeminy a posunutí u 2 excitačních cyklů) – **časová doména** | Bomag, Německo |
| Terrametr | $E_{vib}$ [MN/m²] | dynamický modul pružnosti zeminy pod bubnem (vztah sklonu kontaktní síly zeminy a posunutí během zatěžování) – **časová doména** | Bomag, Německo |
| ACE | $k_B$ [N/m] | tuhost půdy pod bubnem (odvozená ze vztahu kontaktní síly zeminy a posunutí při maximálním průhybu bubnu) – **časová doména** | Ammann, Švýcarsko |

Kromě CCC lze aplikovat i bodové kontrolní metody: zkoušky s dynamickou deskou, nejlépe s deflektometrem (LFWD), nebo zkoušky se statickou deskou, zkoušky pro stanovení hustoty v kombinaci s výsledky laboratorních zkoušek a lehkou (DPL), střední (DPM) nebo těžkou (DPH) dynamickou penetrací, a dále kuželové penetrační zkoušky (CPT).

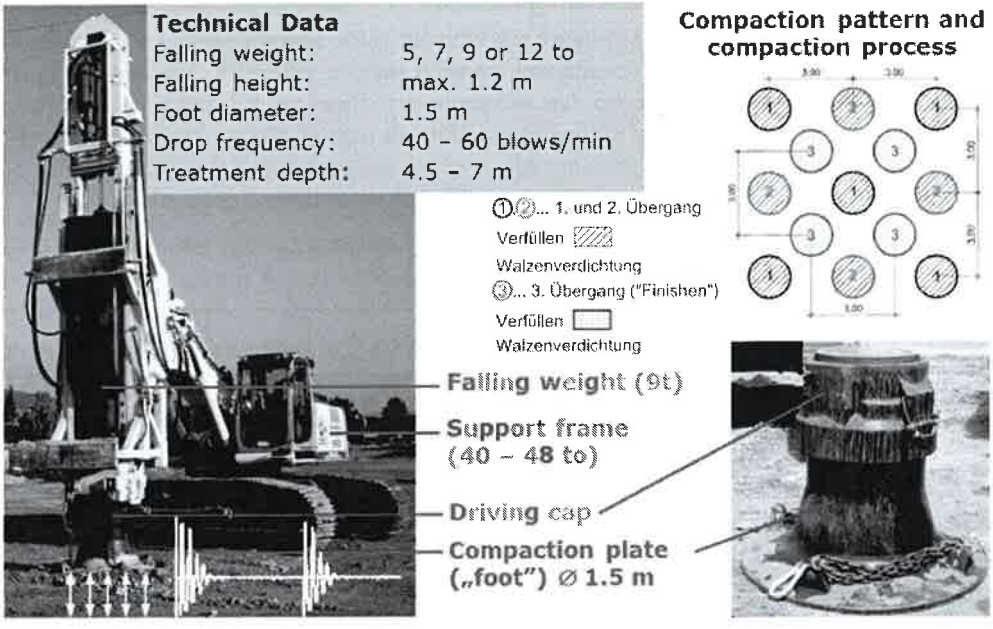
## Rázové zhutnění a kontrola kvality

### Rázový zhutňovač

Rázový zhutňovač je inovativní dynamické zhutňovací zařízení, založené na technologii beranidel pro zarážení pilotů, která se používá ke zvýšení únosnosti půdy prostřednictvím řízených rázů. Principem této metody je spouštění padajícího závaží z relativně malé výšky na speciální patu s vysokou frekvencí, přičemž pata zůstává trvale v kontaktu se zemí. V současné době jsou ve střední Evropě dostupná zařízení, která vyplňují mezeru mezi metodami povrcho-

vého hutnění (např. zhutňování válcováním) a metodami hloubkového hutnění (např. hluboké dynamické zhutňování/výměna) a umožňují středně hlubokou úpravu zeminy.

Rázový zhutňovač se skládá hlavně ze tří rázových součástí: rázová pata, nástavec a beranidlo se závažím. Rázová pata je vyrobena z oceli a má průměr 1,5 m. Zůstává trvale v kontaktu se zemí. Nástavec připojený k patě umožňuje kloubové spojení. Rázová pata, nástavec a závaží jsou připojeny k tzv. beranidlu. Padající závaží o hmotnosti 5 000, 7 000, 9 000 nebo 12 000 kg se spouští z výšky až 1,2 m při frekvenci 40 až 60 pádů za minutu (*obr. 9*) [6],[14]



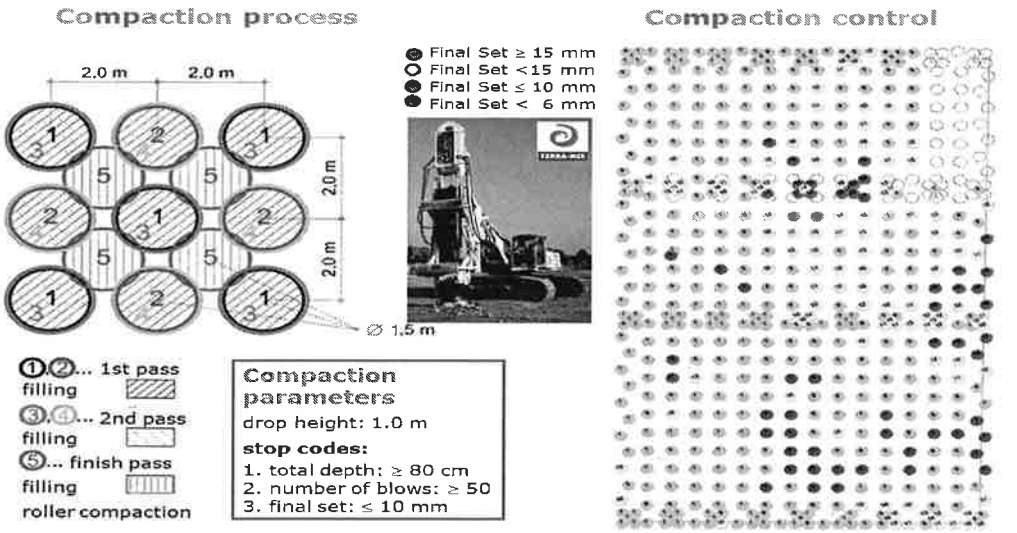

*Obr. 9* Rázový zhutňovač (vlevo), rázová pata s nástavcem (vpravo dole), vzor zhutňování a postup zhutňování (vpravo nahoře)

Rázový zhutňovač umožňuje středně hluboké hutnění až do hloubky cca 4–7 m efektivním a úsporným způsobem. V porovnání s jinými metodami dynamického zhutňování, pokud jde o hloubku účinku, se ukazuje, že rázové hutnění je ideální alternativou k povrchovému hutnění (statické a dynamické válce) a hlubokému hutnění (hluboké vibrační hutnění, vibroflotační hutnění a hluboká vibrační výměna či těžké pěchování).

Všechny materiály s dynamickým zhutňovacím potenciálem, jako jsou štěrky, písky, spraše, vedlejší průmyslové produkty, hlušina či skládkový materiál, mohou být pomocí rázového zhutňovače úspěšně hutněny, zatímco hutnění jílů a zvodnělých naplavenin nelze efektivně provádět. To znamená, že rázové zhutnění se může používat pro zvýšení únosnosti základů, pro zlepšení zemních podmínek pro základové desky, pro snížení zkapalňování zeminy, pro stabilizaci odpadních materiálů a sanaci stávajících náspů a protipovodňových hrází.

**Řízení jakosti**

Monitorování dat během procesu zhutňování spolu s on-line displejem v kabině obsluhy umožňuje kontrolu zhutnění, hospodárné využití zhutňovacího nástroje a integrované řízení kvality. Zastavení se nastaví podle celkové hloubky rázové paty, počtu úderů a poklesu rázové paty po provedení úderu (*obr. 10*).




*Obr. 10* Řízení kvality: dokumentace zhutňovacího procesu a parametrů hutnění (kódy pro zastavení), grafické znázornění

## Případové studie

### Sanace protipovodňových hrází pomocí válce VARIOCONTROL s polygonálním bubnem [3], [8]

Tyto protipovodňové hráze na řece Moravě byly vystaveny vysoce nepříznivým vlivům při povodních v letech 2002 a 2006. V mnoha úsecích došlo ke změkčení a uvolnění výplňového materiálu tělesa náspu, což vyžadovalo rozsáhlou sanaci celého břehu na rakouské straně řeky Moravy. Proto byla vypracována koncepce rekonstrukce; bylo rozhodnuto odstranit stávající těleso náspu, včetně 0,5 m vrstvy půdy pod přirozenou úroveň terénu. Po zhutnění „odstraněného podloží" měl být stávající výplňový materiál zhutňován ve vrstvách; těleso protipovodňového náspu mělo být provedeno až do úrovně koruny, která byla stanovena na základě bilaterální dohody rakouských a slovenských orgánů.

Časová prodleva zemních prací v úseku „Hohenau an der March" se prodloužila kvůli delšímu deštivému období, které způsobilo povodně. Z tohoto důvodu byl vypracován optimalizovaný plán zhutnění. Podle tohoto plánu nebylo potřeba odstranit asi 1,0 m vrstvu stávajícího náspu, včetně 0,5 m vrstvy půdy pod náspem. Poté se zbývající část stávajícího tělesa náspu zhutnila s použitím inovativních automatických válců VARIOCONTROL s polygonálním bubnem. S ohledem na optimalizovaný účinek zhutňování a větší hloubku zhutnění se očekávalo, že zhutnění bylo provedeno také pod virtuální úrovní pláně výkopu posuzovaného v původním plánu.

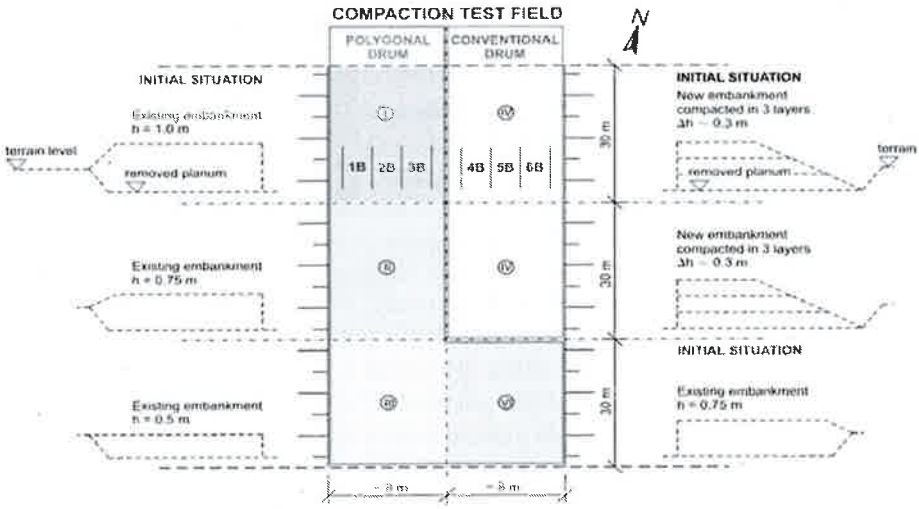
Vhodnost optimalizované koncepce zhutnění byla prokázána na zkušebním území, kde byly porovnány výsledky zhutňování u obou typů bubnů (hladkých a polygonálních). Řízení zhutnění se provádí pomocí systému CCC integrovaného ve válci, lehkou dynamickou penetrací a zkouškami s dynamickou deskou.

Výplňový materiál stávajícího protipovodňového náspu na zkušebním území se skládá převážně z písčitých naplavenin až prachovitých písků a částečně pouze z písků s rovnoměrnou

velikostí zrn. Přirozená vrstva půdy pod náspem měla podobné složení zemin, přičemž dominovaly písečné naplaveniny.

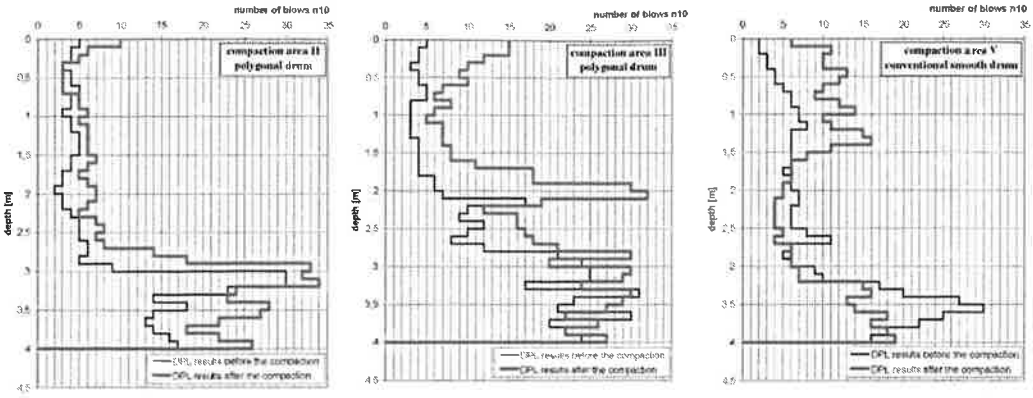
Zkušební území (90 m x 16 m) bylo rozděleno do 6 úseků o délce 30 m (*obr. 11*). Na zkušebních územích pro válec s polygonálním bubnem byla rozdílná tloušťka zbývající vrstvy tělesa stávajícího náspu (1,0; 0,75 a 0,50 m). Tato změna byla provedena pro stanovení optimální tloušťky zbývající vrstvy půdy, přičemž se zohlednilo zhutnění přirozené půdy pod úrovní pláně výkopu. Zhutnění bylo provedeno 12t válcem VARIOCONTROL s polygonálním bubnem. Na dvou územích byl výplňový materiál zcela odstraněn a nakonec byl zhutněn ve vrstvách 12t vibračním válcem s běžným hladkým bubnem, aby se porovnaly výsledky různých typů bubnů.

Kontrola kvality zhutnění byla provedena pomocí systému průběžné kontroly zhutnění Terrametr ($E_{vib}$), integrovaného ve válci a bodovými zkouškami deflektometrem (LFWD). Po každém přejetí válce byly zaznamenány hodnoty CCC ($E_{vib}$), až zvýšení zhutnění dosáhlo požadované minimální hodnoty < 5 %. Naměřené hodnoty vibračního modulu $E_{vib}$ ukázaly velmi homogenní zhutnění na zkušebních územích, kde byl použit polygonální buben. Průměrné zvýšení vibračního modulu bylo v rozmezí 42 % až 69 % při zhutňování s polygonálním bubnem na území stávajícího náspu. Ačkoli měření s běžným bubnem vykazovalo vyšší hodnoty zhutnění $E_{vib}$, homogenita zhutnění nebyla tak vysoká jako v případě polygonálního bubnu. Vysoké hodnoty $E_{vib}$ byly primárně způsobeny různými parametry stroje.




*Obr. 11* Zkušební území pro výběr technologie zhutnění a optimalizaci procesu zhutnění.

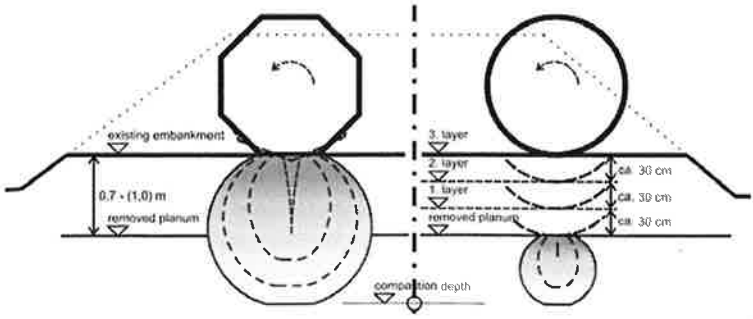
Relativní hustota byla stanovena lehkou dynamickou penetrací (DPL) na vybraných místech na jednotlivých územích před zhutněním a po něm. Po zvýšení DPL byly na zkušebních územích, hutněných pomocí polygonálního bubnu, zaznamenány údery až do hloubky cca 1,5 až 2,0 m (*obr. 11*). Z výsledků zkoušek DPL provedených na územích hutněných hladkým bubnem vyplývá zvýšení úderů do hloubky asi 1,6 m (*obr. 12*). Kromě toho se při DPL také testovalo dynamické zatížení desky. Naměřený modul dynamické deformace ($E_{vd}$) se silně měnil v závislosti na půdních parametrech zhutněného výplňového materiálu.




*Obr. 12* Kontrola zhutnění s lehkou dynamickou penetrací (DPL) na vybraných územích zhutnění (polygonální buben: území zhutnění II a III; běžný hladký buben: území zhutnění V).

Komplexní měření provedené v průběhu zkoušek zhutňování ukázalo, že účinné zhutňování lze provádět s použitím polygonálního bubnu. Strukturovaný tvar bubnu zajišťuje soustavné „hnětení" jemného, nebo smíšeného materiálu s následným uvolněním napětí. Tato metoda zhutňování zajišťuje homogenní zhutnění v celé hloubce hutnění. Homogenita byla zobrazena na grafickém znázornění CCC.

Na základě vyhodnocení výsledků testů bylo zjištěno, že optimalizované zhutnění pomocí polygonálního bubnu bylo technicky ekvivalentní s původním plánem zhutňování při maximální tloušťce vrstvy cca 0,7–(1,0) m nad úroveň pláně výkopu (*obr. 13*). Tloušťka jednotlivých vrstev by mohla být při budování náspu zvýšena, aby se zvýšila hloubka zhutnění ve srovnání s běžným bubnem. Významným ekonomickým výsledkem pak byla významná časová úspora u těchto zemních prací.

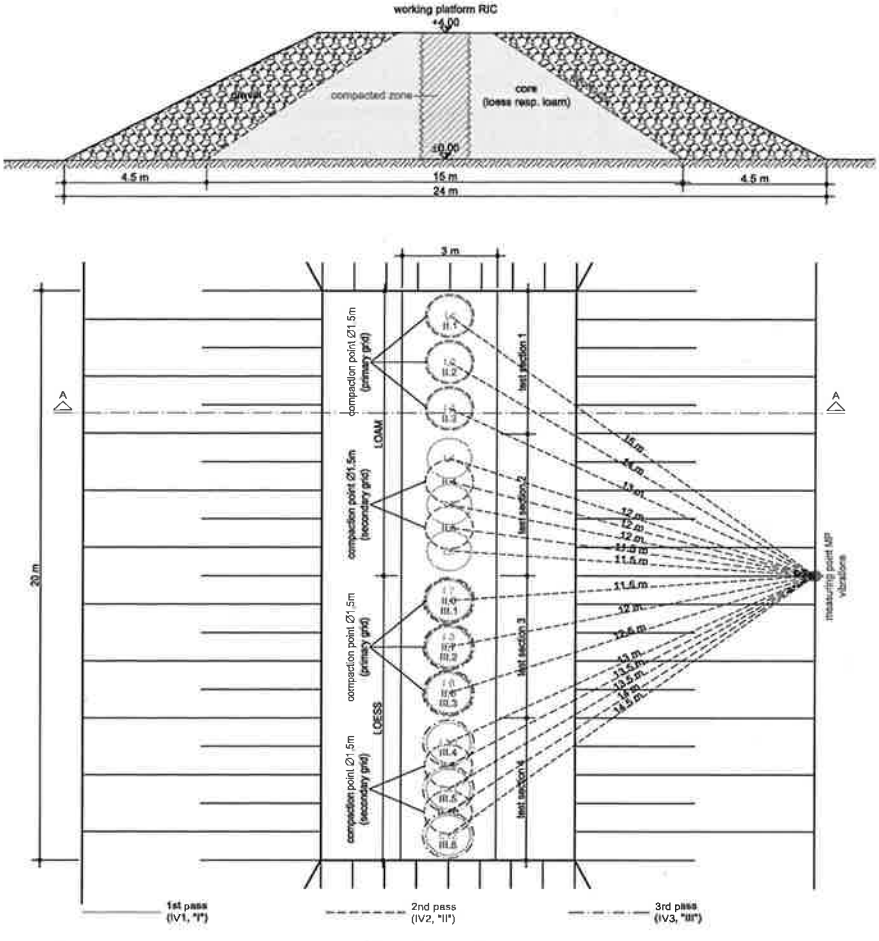



*Obr. 13* Účinek zhutnění pomocí polygonálního bubnu ve srovnání s běžným hladkým bubnem.

**Sanace protipovodňových hrází pomocí rázového zhutňovače[5], [8]**

Vhodnost použití rázového zhutňovače ke zlepšení stavu stávajících protipovodňových hrází ve srovnání například s metodou lití na místě (MIP) byla zjišťována zhutněním jádra zkušební hráze. Postup zhutňování a řízení zhutnění je shrnut v následující části.

Zkušební hráz byla provedena na štěrkovém podkladu, který byl pokryt vrstvou spraše o tloušťce cca 0,75 m. Základ náspu (cca 14 m x 35 m) se zhutnil vibračním válcem a byly provedeny zkoušky s dynamickou deskou s použitím deflektometru (LFWD).




*Obr. 14* Průřez a situace zkušební hráze včetně zkušebních úseků.

Jádro náspu bylo provedeno ve vrstvách o tloušťce cca 1 m. Každá vrstva byla jen „předzhutněna" vibračním válcem, aby se simulovalo slabé zhutnění stávající nevyhovující protipovodňové hráze. V jedné části jádra náspu se jako výplňový materiál použily písečné naplaveniny (spraše), v jiné pak naplaveniny (hlíny). Úbočí a svahy byly provedeny z písečného štěrku. *Obr. 14* znázorňuje geometrii a rozměry zkušební hráze.

Pracovní plošina na zkušebním území, tj. horní část náspu, byla rozdělena do čtyř zkušebních úseků o délce cca 5 m (*obr. 12*). Zkušební úseky 1 a 2 se nacházely na hliněném jádru zkušební hráze, úseky 3 a 4 na sprašovém jádru.

Parametry pro rázové zhutnění byly zvoleny následovně:

- Průměr rázové paty: 1,5 m.
- Primární rastr se skládal ze tří rovnoměrně rozmístěných bodů zhutnění v každém zkušebním bodu.

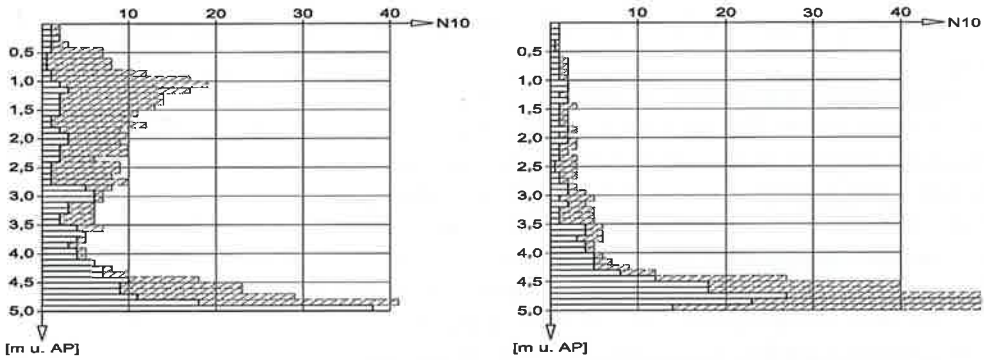
- Sekundární rastr pro zkušební úseky 2 a 4 se skládal ze dvou bodů zhutnění, které byly posunuty o polovinu průměru rázové paty.
- Proces hutnění se skládal ze dvou, respektive tří přejezdů přes primární rastr (zkušební úseky 1 a 4, resp. zkušební úsek 3) a jednoho přejezdu přes sekundární rastr (zkušební úseky 2 a 4). Po každém průjezdu byly krátery po zhutnění vyplněny jádrovým materiálem a zhutněny vibračním válcem.

Zhutnění se provádělo s těmito kódy pro zastavení:

- kód pro zastavení 1: úplné sednutí (hloubka kráteru po zhutnění) > 0,8 m;
- kód pro zastavení 2: počet úderů na místo zhutňování > 40;
- kód pro zastavení 3: konečné sednutí při posledním úderu <10 mm.

Optimalizace a řízení zhutnění bylo provedeno na základě následujících kroků a kritérií:

- Splnění kritéria kódu pro zastavení.
- Integrovaná dokumentace výrobních parametrů pro každý bod zhutnění, tj. počet úderů, konečné sednutí při posledním úderu, hloubka kráteru po zhutnění, energie zhutňování a průměrný počet úderů. Parametry zhutňování byly elektronicky monitorovány pro každý bod zhutnění v průběhu procesu zhutňování a automaticky zaznamenány (získávání dat řízené GPS).
- Provádění těžké dynamické penetrace (DPH) před a po zhutnění.
- Provádění zkoušky s dynamickou deskou (LFWD) před a po zhutnění.
- Zkoušky propustnosti na místě pomocí systému BAT.
- Provedení měření vibrací u paty přehrady mezi zkušebními úseky 2 a 3.




*Obr. 15* Těžká dynamická penetrace (DPH); srovnání počtu úderů $N_{10}$ před (černá) a po (červená) zhutňování s RIC na zkušebních úsecích 2 (vlevo) a zkušebním úseku 3 (vpravo).

V následujících vybraných výsledcích zkoušek dynamickou penetrací jsou uvedeny jako příklad ty, které se prováděly za účelem určení hloubky zhutnění, zachycuje počet úderů $N_{10}$ nad hloubkou stanovenou těžkou dynamickou penetrací (DPH) na zkušebních úsecích 2 (hlína) (spraše). Je zřejmé, že hloubkový účinek RIC je cca 4,5 m. Dále obrázek znázorňuje, že horní zóna štěrkové zeminy pod náspem byla také zhutněna. Zatím co se ve výsledcích těžké dynamické penetrace jasně odráží zlepšení sprašového jádra, zvýšení počtu úderů u hliněného jádra není tak výrazné. Je třeba vzít v úvahu, že těžká dynamická penetrace vykazuje pouze nízký počet úderů v soudržných zeminách měkké až tuhé konzistence, nezávisle na stupni zhutnění. Proto se pro kontrolu výsledku zhutňování u těchto typů půd doporučuje použít lehkou dynamickou penetraci, nebo kuželové penetrační zkoušky (CPT) [14].

## Závěr

Využití inovativních metod hutnění (vibrační, ručně ovládané válce VARIO a automatické válce VARIOCONTROL s polygonální bubnem; rázové hutnění) pro sanaci, respektive výstavbu protipovodňových hrází vykazuje významnou optimalizaci s ohledem na technické řešení i ekonomické aspekty (náklady, doba výstavby).

Hlavní výhody použití automatických **válců VARIOCONTROL s polygonálním bubnem** lze shrnout takto:

- Tloušťku vrstvy hutněné zeminy lze zvýšit díky lepšímu výsledku zhutňování a hloubce zhutnění v porovnání s běžným hladkým bubnem. V důsledku toho umožňuje zesílení vrstvy významnou časovou úsporu při provádění zemních prací.
- Tvar bubnu zajišťuje nepřetržitý „hnětací" účinek s následným uvolněním napětí v důsledku homogenního hutnění a jeho lepšího výsledku. Částice zeminy se při hutnění pohybují do strany, čímž lze rychleji snížit nadměrný tlak pórové vody zejména u jemnozrnných zemin. Může být snížena tendence ke zhoršení konzistence soudržných zemin.
- Pronikání hran polygonálního bubnu do země zabraňuje nadměrnému zhutnění povrchu vrstvy. To znamená, že později dochází ke vzniku „efektu kůry", která brání zhutnění v hlubších vrstvách, ve srovnání s použitím běžného hladkého bubnu; energie pro zhutnění může být lépe přenesena na hlubší vrstvy půdy.
- Plochy a hrany polygonálního bubnu vytvářejí na povrchu zhutněné vrstvy jednotný „valchový vzor". Tento vzor umožňuje dobré spojení s překrývanou vrstvou půdy.
- Průběžná kontrola hutnění (CCC) integrovaná ve válci představuje v současné době standardní měřicí systém pro dynamické válce a může se využívat pro dokumentaci, optimalizaci a hodnocení kvality. Lze ji také používat u válce s polygonálním bubnem.

Sanace protipovodňových hrází pomocí **rázového zhutňovače** má zejména následující výhody:

- Výsledkem rázového zhutnění je zejména středně hluboké zhutnění zeminy a také odstranění a výměna zeminy. Tím lze dosáhnout významného snížení objemu zeminy. Snížený objem se nahrazuje vhodným výplňovým materiálem. Následné zhutnění má za výsledek zlepšenou „zátkovou" zónu, respektive proniknutí výplňového materiálu do zpracovávané zeminy.
- Díky zhutnění půdy, tj. snížení podílu prázdných dutin, lze vytvořit jádro hráze s nízkou propustností. Kromě toho jsou kompletně uzavřeny stávající dutiny ve struktuře zeminy a jsou odstraněny stávající zóny s vyšší propustností, např. nepravidelné písčité čočky.
- Využití rázového zhutňovače pro sanaci protipovodňových hrází umožňuje významné zvýšení nosnosti a stability hráze, a tím snížení rizika její eroze.

## Literatura

[1] ADAM, D. *Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) mit Vibrationswalzen*. Diplomová práce, Technische Universität Wien (v němčině).

[2] ADAM, D., KOPF, F. *Operational devices for compaction optimization and quality control (Continuous Compaction Control & Light Falling Weight Device)*. Sborník z mezinárodního semináře International Seminar on Geotechnics in Pavement and Railway Design and Construction, str. 97–106, 16.–17. Atény, Řecko, 2004.

[3] ADAM, D. *Geotechnische Stellungnahme über die Optimierung des Erdbaus mittels Vario-Control-Walze mit Polygonbandage zum Projekt Sanierung Hochwasserschutz March Hohenau*. Geotechnik Adam ZT GmbH, A-2345 Brunn am Gebirge, Wiener Straße 66 72/15/4, Rakousko, 2009.

[4] ADAM, D. *Geotechnische Stellungnahme über die alternative Bodenverbesserung mittels Impulsverdichtung – Eignungsprüfung Impuls-Verdichtung zum Projekt Hochwasserschutz Kamp, Abschnitt Jettsdorf, Fluss km 7+140 bis 9+860.* Geotechnik Adam ZT GmbH, A-2345 Brunn am Gebirge, Wiener Straße 66 72/15/4, Rakousko, 2009.

[5] ADAM, D. *Geotechnische Stellungnahme über den Probedamm Kiesgrube Fischamend.* Geotechnik Adam ZT GmbH, A-2345 Brunn am Gebirge, Wiener Straße 66 72/15/4, Rakousko, 2008.

[6] ADAM, D., PAULMICHL, I. *Impact Compactor – an innovative dynamic compaction device for soil improvement.* Sborník z 8. mezinárodní geotechnické konference, (4. a 5. červen 2007, Slovenská technická univerzita v Bratislavě, Slovensko) str. 183–192, 2007, Bratislava, Slovensko.

[7] ADAM, D., SZABO M., PAULMICHL, I. *Einsatz von innovativen Verdichtungstechnologien zur Sanierung von Hochwasserschutzdämmen.* FCP Jubiläumsbuch. Wien, 2010.

[8] ADAM, D., SZABO M., PAULMICHL, I. *Innovative compaction technologies for rehabilitation of flood protection dikes.* 14. dunajsko-evropská geotechnická konference. 2.–4. červen 2010, Bratislava, Slovensko.

[9] BRANDL, H. *Failures and defence of flood protection dykes and levees.* Siegen 4. Symposium „Sicherung von Dämmen, Deichen und Stauanlagen". 23.–24. únor 2012, Siegen, Německo.

[10] BRANDL, H., BLOVSKY, S. *Zustandsbewertung, Überwachung, Sicherung und Sanierung von Deichen bzw. von Hochwasserschutzdämmen.* In: Sicherung von Dämmen und Deichen, R. Herrmann, J. Jensen (Hrsg.); Universitätsverlag. Siegen, Německo, 2003.

[11] BRANDL, H., BLOVSKY, S.; SZABO, M. Flood Risk II – *TP7.1 – Instandhaltung von Dämmen – Modell für ein Zustandsmonitoring und Sicherheitskonzepte.* BMVIT und Lebensministerium der Bundesrepublik Österreich, Vídeň, 2009.

[12] BRANDL H.; SZABO M. *Hydraulic failure of flood protection dykes.* Sborník z 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2.–6. září 2013, Paříž, Francie.

[13] MARKIEWICZ, R.: *Untersuchungen zur Arbeitsweise und Tiefenwirkung der Polygonbandage auf nichtbindigem Boden.* Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Wien, Vídeň, Rakousko, 2001.

[14] PAULMICHL, I., FÜRPASS, J. *Mitteltiefe Bodenverbesserung mit dem Impulsverdichter – Fallbeispiele aus der Praxis.* Tagungsband der 7. Österreichischen Geotechniktagung, v němčině, 2009. 21.–22. leden 2009, Vídeň, Rakousko.

[15] SZABO, M. *Posúdenie stavu protipovodňových hrádzí pomocou nepriamych geotechnických metód.* Geotechnické problémy líniových stavieb, Slovenská technická univerzita, 30.–31. květen 2011, Bratislava, Slovensko.