

Ulf Arborelius, Henrik Almström, Jenny Bursell, Anders Sondén,
Jonas K Persson

Utveckling av en experimentell modell för studiet av inverkan av undervattenstryckvågor på centrala nervsystemet och hörselorganen

Ulf Arborelius, Henrik Almström, Jenny Bursell, Anders Sondén,
Jonas K Persson

Utveckling av en experimentell modell för studiet av inverkan av undervattenstryckvågor på centrala nervsystemet och hörselorganen

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut – FOI NBC-skydd, Institutionen för Försvarsmedicin, Enheten för Experimentell Traumatologi Retzius väg 8, B1:5 Karolinska institutet 171 77 Stockholm	Rapportnummer, ISRN FOI-R--1112--SE	Klassificering Användarrapport
	Forskningsområde 8. Människan i totalförsvaret	
	Månad, år Januari 2004	Projektnummer E4413
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 82 Vapentraumatologi	
Författare/redaktör Ulf Arborelius Henrik Almström Jenny Bursell Anders Sondén Jonas K Persson	Projektledare Ulf Arborelius	
	Godkänd av Thomas B Kjellström, Tjänsterförrättande AC	
	Uppdragsgivare/kundbeteckning Försvarsmakten	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Ulf Arborelius	
Rapportens titel Utveckling av en experimentell modell för studiet av inverkan av undervattenstryckvågor på centrala nervsystemet och hörselorganen.		
Sammanfattning (högst 200 ord) Projektet syftar till att öka kunskapen om hur en människas centrala nervsystem samt hörsel- och balansorgan påverkas av undervattensstötter och undervattensbuller. Denna kunskap är mycket angelägen för revision av säkerhetsbestämmelser och för riskbedömning av tillkommande exponering, fr.a från olika sonarsystem. En modell för att exponera smådjur för undervattenstryckvågor och för att värdera effekterna på djuret har utvecklats, testats och satts i drift. Tryckvågorna genereras genom att ett vattenfyllt rör, med djuret i, får falla ner på en granitplatta. Djuren är sövda och andas syrgas i ett öppet system. Initiala försök, med 180 kPa tryckvåg, visar på en förändring av hjärnaktiviteten (EEG). Biokemiska parametrar kommer också att analyseras.		
Nyckelord Undervattensexlosioner, människa, centrala nervsystemet, hörselorgan		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 24 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency NBC-defence, Dept. of Defence medicine, The unit for Experimental Traumatology Retzius väg 8, B1:5 Karolinska institutet SE-171 77 Stockholm Sweden	Report number, ISRN FOI-R--1112--SE	Report type User report
	Programme Areas 8. Human Systems	
	Month year January 2004	Project no. E4413
	General Research Areas 5. Commissioned Research	
	Subcategories 82 Experimental Traumatology	
Author/s (editor/s) Ulf Arborelius Henrik Almström Jenny Bursell Anders Sondén Jonas K Persson	Project manager Ulf Arborelius	
	Approved by Thomas B Kjellström, Acting Head of Division	
	Sponsoring agency The Swedish Armed Forces	
	Scientifically and technically responsible Ulf Arborelius	
Report title (In translation) Development of an experimental model for study of the effects of under water shockwaves on the central nervous system and hearing organs.		
Abstract (not more than 200 words) The main focus of this project is on how the human central nervous system and auditory and vestibular organs are influenced by underwater shock waves and noise. This knowledge is necessary for revision of safety rules and for evaluation of new risks, like exposure from different sonar systems. A model for exposure of small animals to underwater shock waves and for evaluation of the effects on the animals was developed, tested and implemented. The shock waves were generated inside a water filled tube which, with an animal in the water, was allowed to fall down on a stone plate. The animals were under general anaesthesia and were breathing oxygen on an open system. Initial experiments, using 180 kPa shock waves, showed changes in brain activity (EEG). Biochemical parameters will also be analyzed.		
Keywords Underwater explosion, humans, central nervous system, hearing organs		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 24 p.	
	Price acc. to pricelist	

FOI, NBC-skydd, Institutionen för Försvarsmedicin,
Enheten för Experimentell Traumatologi

Utveckling av en experimentell modell för studiet av inverkan av undervattenstryckvågor på centrala nervsystemet och hörselorganen

Ulf Arborelius, Henrik Almström, Jenny Bursell, Anders Sondén, Jonas K Persson

Innehållsförteckning

1	Introduktion	5
2	Utveckling av system för tryckvågsexponering i vatten	6
2.1	Målsättning och bakgrund	6
2.2	Tryckvågsgenerator	7
2.2.1	Konstruktion	7
2.2.2	Funktion	8
2.2.3	Uppmätta tryckförlopp	9
2.3	Bedömning av konstruktionen	11
2.4	Modifikationer och installation	11
2.5	Kalibrering	11
3	Simulering av tryckvågor med utgångspunkt från kalibreringsmätningarna.	12
3.1	Inledning	12
3.2	Endimensionell simulering	13
3.3	Analys av vattenbehållaren	15
3.4	Tvådimensionell simulering med polyetylenrör	17
3.5	Sammanfattning	21
4	Biologisk skadevärderingsmodell	21
4.1	Narkosmetod och syresättning	21
4.2	EEG – hjärnaktivitetsmätning	22
5	Exponeringsexperiment	22
5.1	Material och metod	22
5.2	Preliminära resultat	23
5.3	Diskussion	24
6	Kommande inriktning	24
	Referenser	24

1 Introduktion

Projektet initierades 2002 av Försvarsmakten som upplevde ett behov av ökad kunskap om hur undervattenstryckvågor påverkar personer som simmar eller dyker. Dessa frågor är relevanta för exposition både av militär personal och allmänheten och för olika källor till tryckvågor.

Riskbedömning inom detta område är bl.a synnerligen viktigt vid bedömningar av hur stora områden som behöver stängas av när undervattensdetonationer planeras eller riskeras (t.ex vid kontroll av ledningar till fasta mineringar).

Nära detonationspunkten finns stor risk för död och allvarliga skador, fr.a. till följd av skador i luftförande organ, som lungor och tarmar. Dessa typer av skador är inte aktuella när vi diskuterar vilka nivåer som skall tillåtas utanför en avspärning. I de senare fallen har i stället frågor väckts om hur centrala nervsystemet (hjärna och ryggmärg) skulle kunna påverkas direkt, eller indirekt via störning på hörsel- och balansorgan.

Litteraturstudier som utförts av FOA/FOI (Gennser 1999 och Suneson 2000) har visat att kunskapen inom detta område är otillräcklig. Kompletterande litteratursökning, med samma negativa resultat, har gjorts inom det aktuella projektet.

Inom försvaret har också farhågor väckts kring potentiella arbetsmiljöproblem vid exposition för sonarsändningar i olika frekvensområden.

Till dessa problem kommer frågorna om skadligheten hos undervattensbuller, som genereras av t.ex tryckluftsdrivna verktyg. Stor osäkerhet råder om hur skadligheten hos undervattensbuller skall värderas. Det finns mycket data om påverkan på hörseln av luftöverfört ljud - men stor osäkerhet om hur dessa data skall användas när ljudvågorna överförs via vatten.

I skärgårdsmiljö omvandlas de stötvågor, som uppstår vid detonation under vatten, snabbt till sammansatta tryckvågor – buller. Spridningen av tryckvågorna påverkas av många faktorer som; vattendjup, vattenförhållanden, öar och vikar.

Projektets övergripande målsättningen är att skapa ett tillräckligt kunskapsunderlag för riskbedömning, avseende effekter på centrala nervsystemet med hörsel- och balansorgan, av situationer där människor kan exponeras för olika former av undervattenstryckvågor.

Det primära användningsområdet för sådan kunskap är som underlag för fastställande av säkerhetsnivåer för olika typer av militär undervattensverksamhet.

För detta syfte behövs en ökad kunskap om hur tryckvågor överförs till kroppen, förs vidare genom olika vävnader, interagerar med dessa vävnader och vilka patofysiologiska verkningar detta har. Denna kunskap förväntas vara till nytta för alla försvarsgrenar och även för andra försvarsmedicinska frågeställningar.

I början på projektet har vi valt att fokusera på så renodlade stötvågor som möjligt, men senare bör även inverkan av buller studeras.

Det första projektåret har ägnats åt utveckling av:

- en modell för att experimentellt åstadkomma relevant tryckvågsexponering på smådjur och
- en djurmodell för att studera effekterna av tryckvågor på centrala nervsystemet med hörsel- och balansorgan.

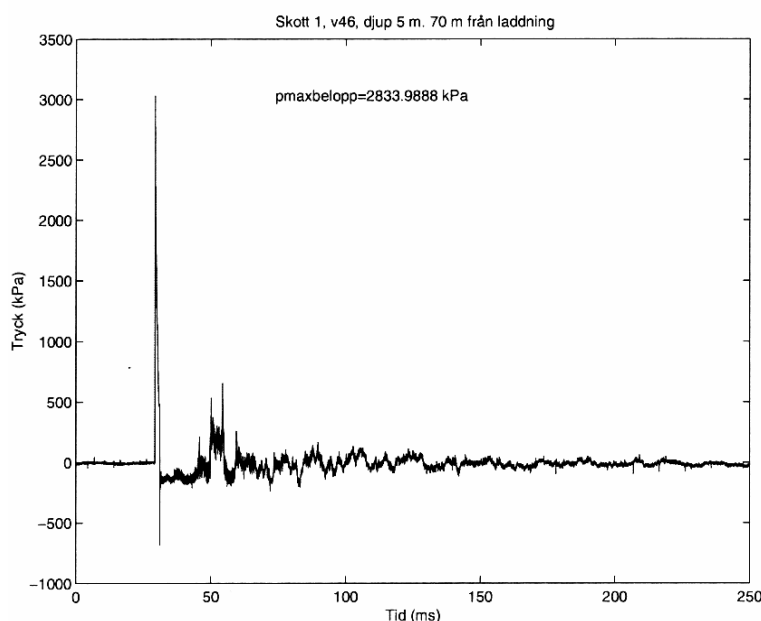
2 Utveckling av system för tryckvågsexponering i vatten

2.1 Målsättning och bakgrund

De krav som ställdes på systemet var att det skulle:

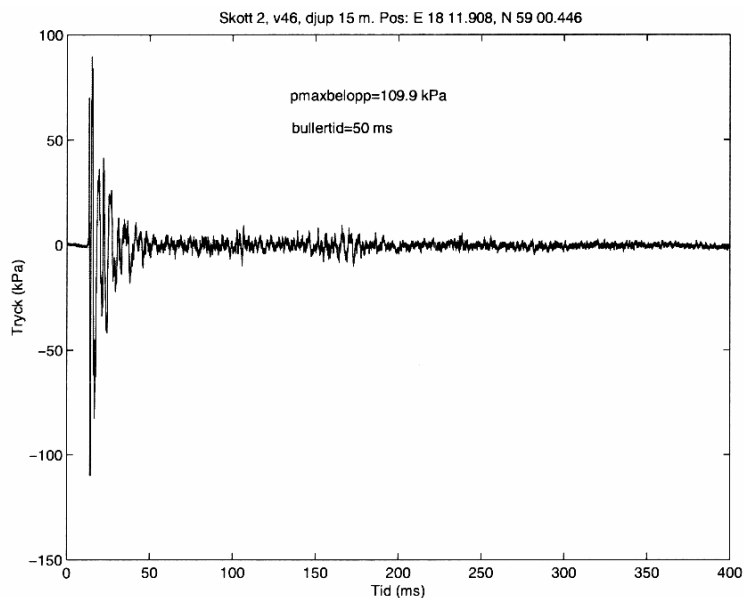
- passa för smådjur (råtta).
- ge väldefinierade tryckvågor av relevant magnitud.
- kunna användas i laboratorium.
- vara säkert och enkelt att använda.
- helst inte baseras på explosivämnesanvändning.
- tillåta användning av elektrofysiologisk registreringsutrustning.

Vid en undervattensdetonation uppträder på korta avstånd (ungefär lika med vattendjupet) en tryckpuls enligt exemplet i nedanstående figur 2:1.



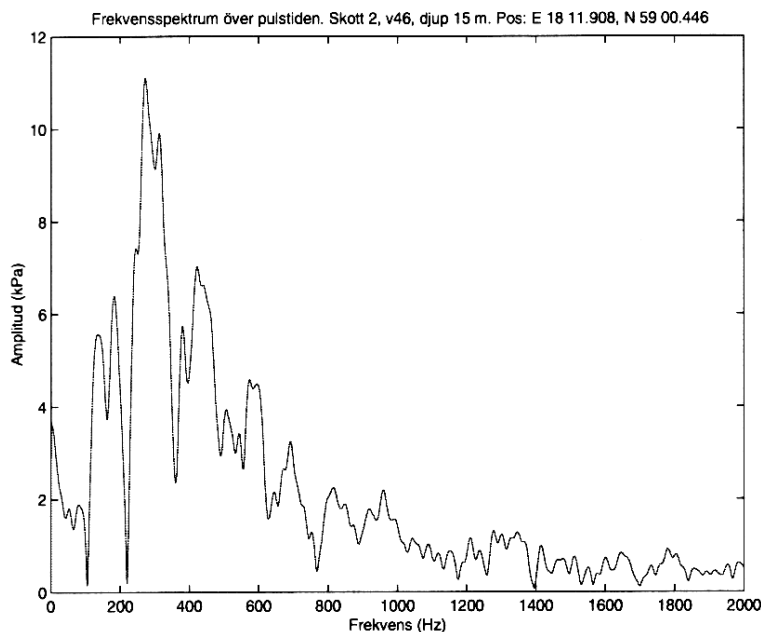
Figur 2:1.

På längre avstånd (mer än ca 10 gånger vattendjupet) bildas på grund av flervägsutbredning pulståg av bullerkaraktär enligt exemplet i figur 2:2.



Figur 2:2.

Frekvensinnehållet i pulståget kan ha utseendet enligt figur 2:3.



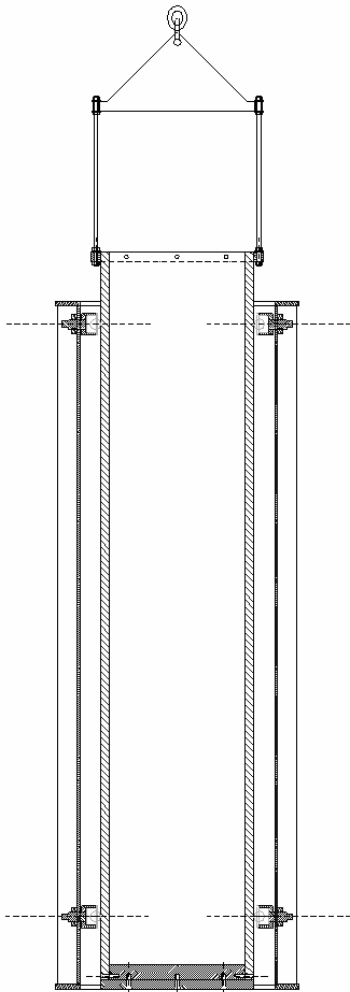
Figur 2:3.

Tryckpulser enligt figur 2:1 kan ge skador på trumhinna, lungor och tarmar medan tryckförlopp enligt figur 2:2, i första hand, ger hörselskador. För att medicinskt studera dessa skadeförlopp har en apparatur för generering av tryckförlopp i vatten tagits fram. Apparaturen skall dels kunna generera enstaka tryckpulser dels pulståg av bullerkaraktär.

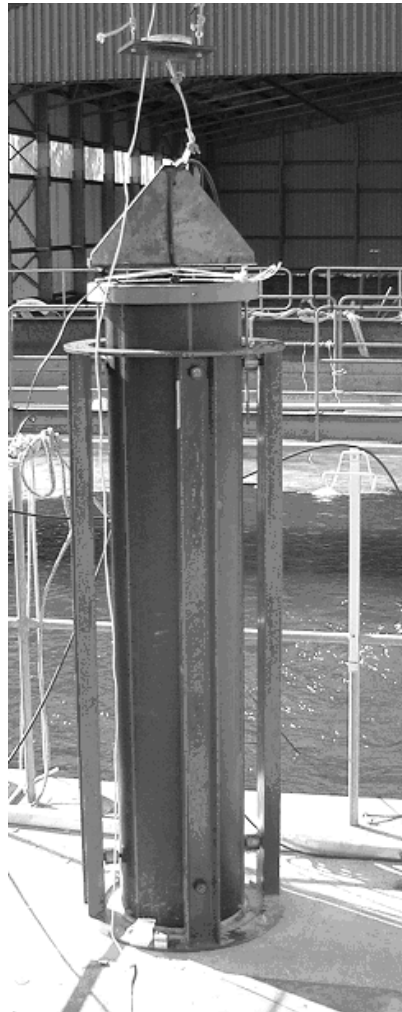
2.2 Tryckvågsgenerator

2.2.1 Konstruktion

Apparaten består av en behållare gjord av ett polyetenrör (PE100, innerdiameter 280 mm, tjocklek 18 mm, längd 1500 mm) och en aluminiumbotten (tjocklek 50 mm), se figur 2:4.



Figur 2:4.



Figur 2:5

Behållaren är fylld med vatten till en höjd av 1.45 m. För att generera tryckvågor i vattnet lyfts behållaren upp till lämplig höjd (maximalt upp till 100 mm) med hjälp av en vantskruv. På lämpligt djup placeras försöksdjuret varefter röret får falla fritt ner mot en plan granitplatta vilken är ingjuten i betonggolvet. När röret faller fritt styrs det i sidled med hjälp av 8 kullager. Frisläppningen av behållaren åstadkoms med hjälp av en elektromagnet. Vid utprovningen av apparaten har en tryckgivare placerats vid en tänkt placering av försöksdjuret (15 cm under vattenytan). Apparaten, under utprovning, framgår av figur 2:5.

2.2.2 Funktion

h betecknar behållarens fallhöjd. När behållaren når granitplattan har den hastigheten

$$u = \sqrt{2gh}$$

där $g = \text{tyngdaccelerationen} = 9.81 \text{ m/s}^2$.

Vattnet i behållaren har samma hastighet som behållaren. Låt oss studera det ideala fallet att vattenpelaren träffar ett helt stelt golv och att vidare behållarens rör är stelt. I detta fall kommer en vattenstötvåg (stegtryck) med övertrycket

$$\Delta p = \rho_0 c_0 u$$

där $\rho_0 =$ vattnets täthet = 1000 kg/m³,
 $c_0 =$ vattnets ljudhastighet = 1460 m/s,

att röra sig upp genom vattnet, från botten till vattenytan, med ljudhastigheten. När tryckvågen når vattenytan omvandlas kompressionsenergin till rörelseenergi och vattnet får hastigheten u uppåt och en avlastningsvåg rör sig nedåt med ljudhastigheten. Om övertrycket i den uppåtgående tryckvågen är större än atmosfärstrycket kommer en kavitationsvåg att röra sig nedåt i vattnet. En tryckgivare på djupet d , under vattenytan, kommer att registrera en tryckpuls med amplituden Δp och varaktigheten

$$\Delta t = \frac{2d}{c_0}$$

När avlastningsvågen når behållarens botten uppstår ett undertryck vid bottenplattan och hela apparaten studsar upp från underlaget. Behållare med vatten gör nu en luftfärd. När vattnet har nått sin högsta höjd faller vattnet och behållaren ner mot underlaget och tryckförloppet upprepas men nu med lägre amplitud på grund av energiförluster.

I det verkliga fallet är golvet och behållarens rör inte stela. Detta leder till att tryckamplituden ges av

$$\Delta p_{reell} = k \Delta p = k \rho_0 c_0 u$$

där $k < 1$.

Då behållarens rör inte är stelt kommer röret att expandera radiellt när röret successivt trycksätts. Potentiell energi lagras nu upp i rörmaterialet varför en svängning uppstår i det sammansatta systemet rör och vatten. Genom att styva upp röret med hjälp av stålringar kan frekvensen på dessa svängningar styras och därigenom efterlikna frekvensinnehållet från verkligt undervattensbuller.

Om endast en puls önskas kan behållaren hindras från att falla ner efter den första studsens genom att utnyttja ett fjäderbelastat kilarrangemang. En sådan tillsats är under tillverkning.

2.2.3 Uppmätta tryckförlopp

Dessa, första försök utfördes vid Avdelningen för Vapen och Skydd, under utprovning av konstruktionen. Som underlag har därför använts ett befintligt betonggolv, i stället för den planerade granitplattan. Vid utprovningen har fallhöjden varierats i stegen 20 mm, 30 mm och 40 mm. Tryckgivaren var placerad på djupet 15 cm. Vid försöken varierades också vidhäftningen mellan behållarens botten och underlaget, genom att fukta cementplattan med vatten alternativt smörja in cementplattan med vakuumsfett.

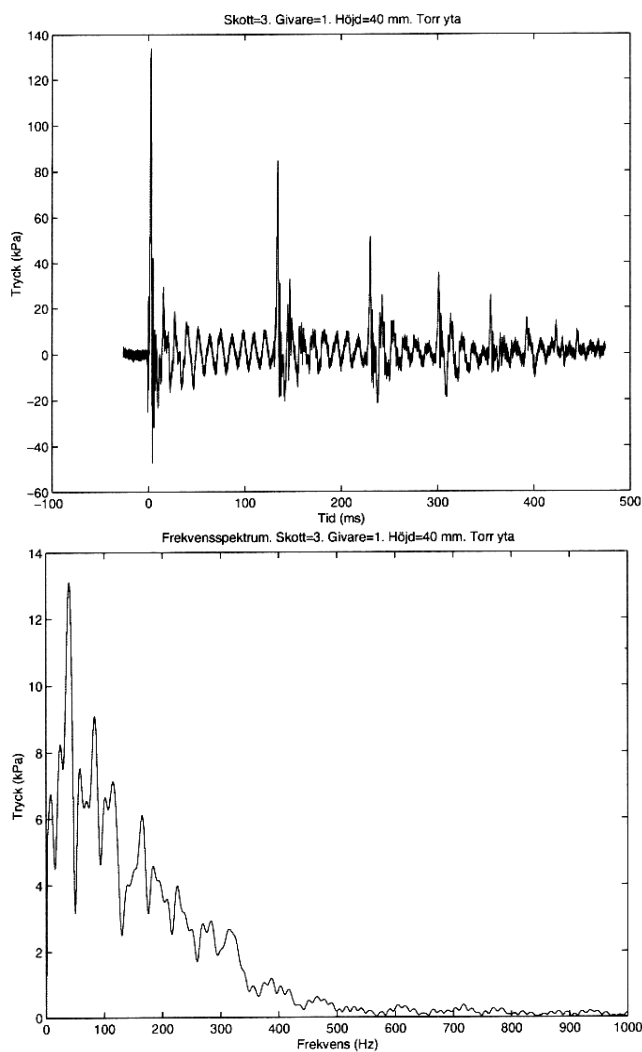
Genomförda försök framgår av nedanstående tabell 2:1.

Tabell 2:1. Tryckförlopp

Fall-nr.	Fallhöjd (mm)	Ytbehandl.	Hastighet (m/s)	Teoretiskt maxövertryck (kPa)	Uppmätt maxövertryck (kPa)
1	20	Torr	0.626	914	90
2	30	Torr	0.767	1135	110
3	40	Torr	0.886	1293	134
4	30	Vattenfuktad	0.767	1135	89
5	30	Infettad	0.767	1135	95
6	20	Infettad	0.626	914	73
7	40	Infettad	0.886	1293	109
8	30	Infettad	0.767	1135	98

Det uppmätta trycket blir ca 10% av det teoretiska maxtrycket. Detta kommenteras vidare nedan. Med torrt underlag erhålles genomgående högre tryckamplituder än med ytbehandlat underlag. Med ytbehandlat underlag erhålles färre studsar än med torrt underlag.

Ett exempel på hela tryckförloppet samt frekvensinnehållet ges i figur 2:6



Figur 2:6

2.3 Bedömning av konstruktionen

Apparaten ger en tryckpuls vars maxtryck styrs av fallhöjden. Pulsens varaktighet bestäms teoretiskt av avståndet från mätpunkten upp till den fria vattenytan men blev längre vid de gjorda försöken. Förklaringen till detta kan vara att röret är för eftergivligt och bör styvas upp. Pulsens följs av ett antal svängningar vars frekvens bestäms av rörets styvhet. Genom att montera stålringar runt röret kan frekvenserna kontrolleras. För att hindra att tryckförloppet upprepas (men med lägre amplitud) måste apparaten hindras från att falla ner efter den första studsens. En anordning som möjliggör detta är under tillverkning.

Apparaten kan också ge en bullerliknande trycksignal genom att apparaten tillåts studsas mot underlaget. Genom att styva upp röret med stålringar kan frekvensinnehållet hos bullret anpassas efter behov. Bullrets varaktighet kan styras genom behandling av kontaktytan mellan behållarens botten och underlaget.

2.4 Modifikationer och installation

För att förbättra stötrörets funktion och tillförlitlighet har flera modifikationer gjorts. Bland annat har röret försetts med flera band av rostfritt stål, som avser att minska effektförluster genom deformation av plaströret.

För att tillförsäkra en ren planträff mellan rörets botten och granitskivan har styrhjul monterats på ramen.

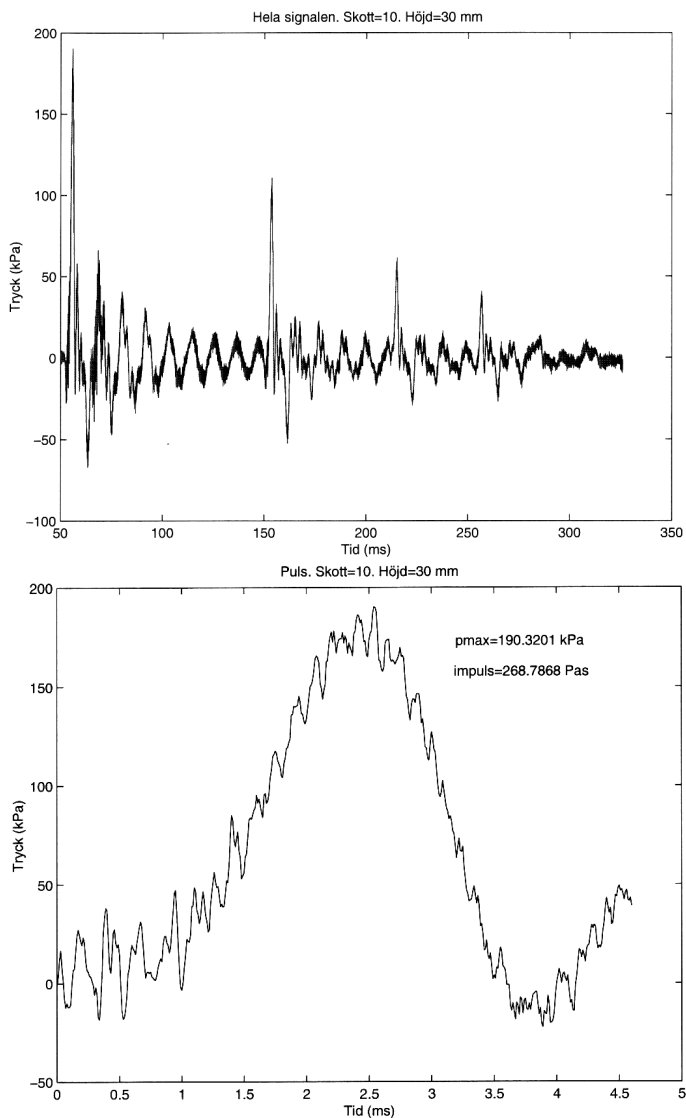
Anordningen har monterats i ett av laboratorierna i bergrumsanläggningen under Södersjukhuset. Hela anläggningen är insprängd i berget, vilket naturligtvis ger ett maximalt stabilt underlag. Eftersom golvet inte är helt plant, och dessutom lutar något, har en planslipad granitskiva fällts in i ett något större hål, som borrats i betonggolvet.

Röret hängs upp i taket och bärs av en elektromagnet, som styrs med ett kraftaggregat. Det vattenfyllda röret hissas upp med en vantskruv, vilket medger både tillräcklig kraft och precision.

2.5 Kalibrering

Efter slutmontering har kalibrering utförts genom tryckmätning i röret.

Nedan visas exempel på registrering av tryckförloppet (15 cm under vattenytan) vid 30 mm fallhöjd. Förloppet visas både under 300 ms (figur 2:7) och de första 5 ms – initialpulsen (figur 2:8).



Figurer 2:7 och 2:8

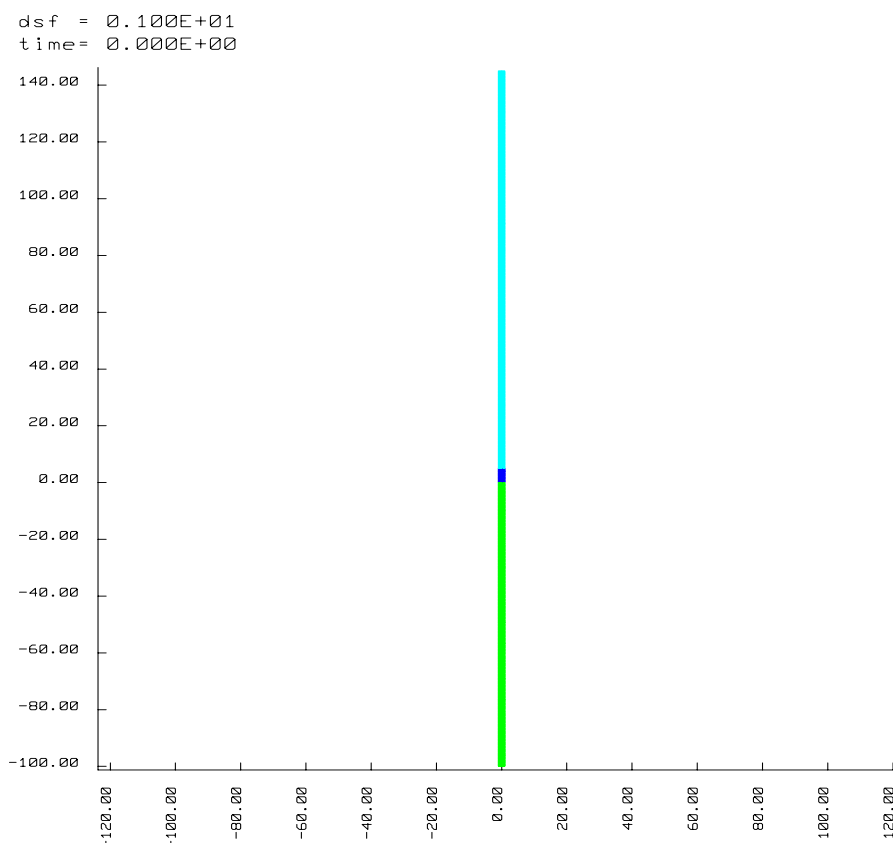
3 Simulering av tryckvågor med utgångspunkt från kalibreringsmätningarna.

3.1 Inledning

I sektion 2 beskrevs en fallapparat som genererar tryckvågor i vatten samt genomförda försök med denna apparat. I denna sektion simuleras fallapparaten numeriskt. Analysen förklarar den stora avvikelserna vad gäller erhållna tryckpulser jämfört med ideala tryckpulser. Problemet med tryckpulserna kan lätt åtgärdas genom byte av röret i fallapparaten från nuvarande polyetylenrör till ett glasfiberarmerat rör. I avsnitt 2 görs en endimensionell analys av fallapparaten. I avsnitt 3 ges förklaringen till det låga trycket hos pulsen jämfört med den ideala pulsen. I avsnitt 4 utförs en realistisk (tvådimensionell) analys av fallapparaten och i avsnitt 5 sammanfattas studien.

3.2 Endimensionell simulering

Vi simulerar en vattenpelare av höjden 140 cm som vilar på en duralplatta med tjockleken 50 mm. Vattnet har atmosfärstryck och den fria vattenytan är trycksatt till en atmosfär. Vattnet och aluminiumplattan faller mot en granitplatta, tjocklek 100 cm, med en hastighet av 1 m/s vid träff. Granitplattans underkant är fast inspänd. Alla material är utsatta för jordaccelerationen ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$). Situationen framgår av figur 3:1.



Figur 3:1. Endimensionell simulering

Hela förloppet simuleras endimensionellt, dvs. ingen avlastning sker i sidled. Beräkningarna utförs med hjälp av datorkoden Dyna2D, ref. 2. Använda materialmodeller:

Dural: modell 2024 enligt Dyna2d-databas

Vatten: modell h2o enligt Dyna2d-databas med $p_c = 0$ (vattnet antas inte kunna ta upp dragspänningar)

$$\rho_{v,0} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

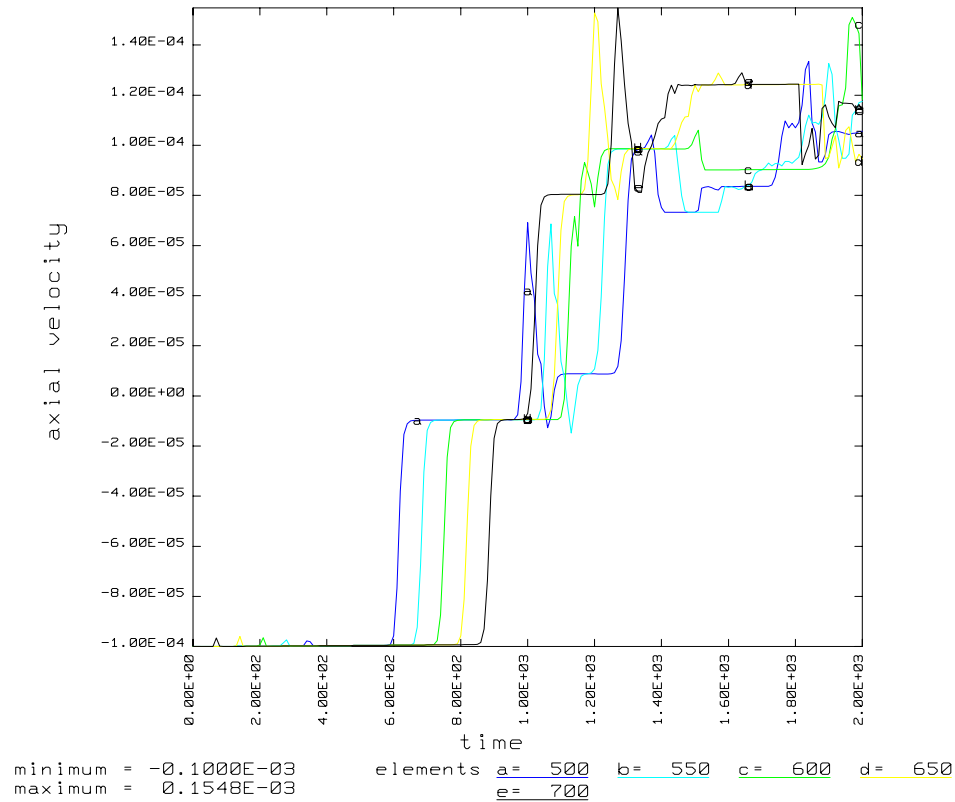
$$c_{v,0} = 1480 \text{ m/s}$$

Granit: $\rho_0 = 2.627 \text{ kg/m}^3$

$$E = 67.55 \text{ GPa}$$

$$\nu = 0.195$$

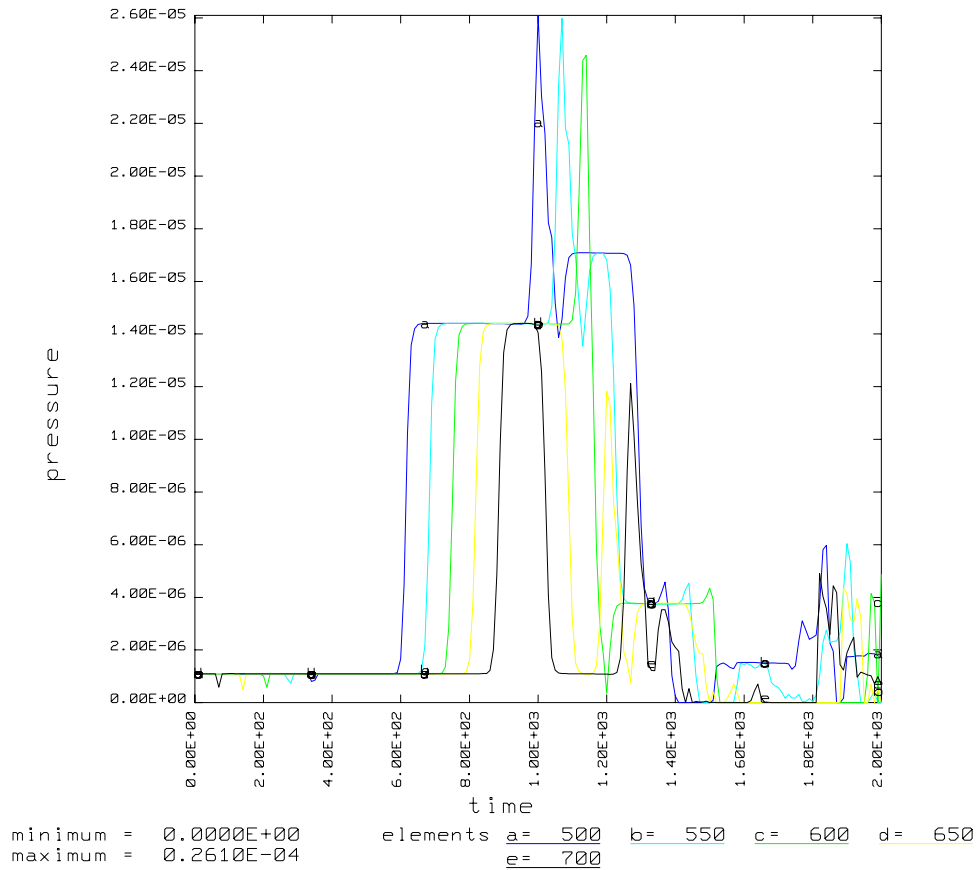
Figur 3:2 visar den vertikala hastigheten i vattnet 5 dm under vattenytan (a), 4 dm under vattenytan (b), 3 dm under vattenytan (c), 2 dm under vattenytan och 1 dm under vattenytan. $10^{-4} \text{ cm}/\mu\text{s} = 1 \text{ m/s}$ i den vertikala skalan. Tidsskala i μs .



Figur 3:2. Vattenhastighet på olika djup

I början är vattenhastigheten nedåt med $u = -1 \text{ m/s}$. När tryckvågen kommer från vattenpelarens botten minskar vattenhastigheten till ca -0.1 m/s för att sedan öka till ca 1 m/s när dragvågen kommer från vattenytan. Trycket i vatten på ovanstående djup ges av figur 3. Tryckskalan är i Mbar dvs. $10^{-6} \text{ Mbar} \approx 1 \text{ atm}$.

Maximala tryckändringen i pulsen ges approximativt av $\Delta p \approx \rho_{v0} c_{v0} u \approx 14.8 \text{ bar}$. Vi ser hur pulsens varaktighet avtar när vi närmar oss vattenytan. Pulsernas varaktighet ges av gångtiden för ljudvågen att gå upp till ytan och sedan tillbaks dvs. $\Delta t = \frac{2 \text{ djup}}{c_v}$ vilket är delar av millisekunder.



Figur 3:3. Trycket på olika djup

3.3 Analys av vattenbehållaren

I ovanstående endimensionella analys är vattenbehållaren helt stel. Vi skall här analysera hur vattenbehållarens ändliga styvhet påverkar möjligheten att hålla vattentryck. Studera en cylindrisk vattenvolym instängd i ett stelt rör, innerradie R , som är avslutad av två stela plattor på avståndet b . Vattnets tryck är p_1 . För vattnet använder vi den förenklade tillståndsekvationen

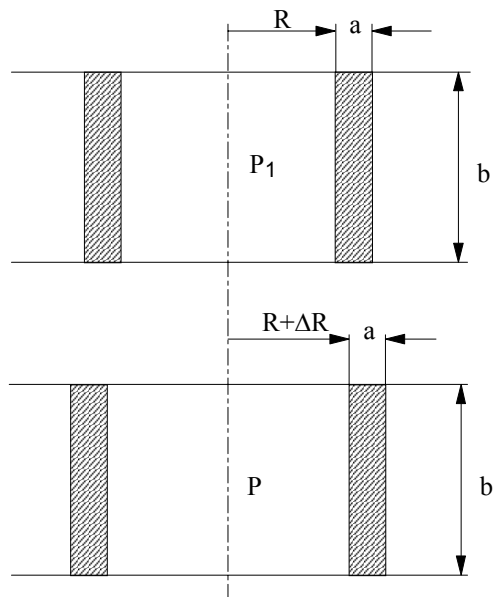
$$p = K_v \left(\frac{\rho}{\rho_{v0}} - 1 \right)$$

där $K_v = \rho_{v0} c_{v0} = 2.25 \text{ GPa}$

Vi har

$$p_1 = K_v \left(\frac{\rho_1}{\rho_{v0}} - 1 \right)$$

Vi byter nu ut det stela röret mot ett elastiskt rör med tjockleken a och med materialegenskaperna E och ν . Situationen framgår av figur 3:4.



Figur 3:4. Trycksättning av rör

Vid det nya jämviktstillståndet gäller

$$p 2(R + \Delta R) = \sigma_{\varphi} 2ab$$

där ΔR är ökningen av radien och där vi försummat minskningen av rörets tjocklek vid belastningen. Hooks lag ger

$$\sigma_{\varphi} = E \varepsilon_{\varphi}$$

där

$$\varepsilon_{\varphi} = \frac{\Delta R}{R + \frac{a}{2}} = \frac{\varepsilon}{1 + \frac{a}{2R}}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R}$$

Vattenmassan ges av

$$M = \pi R^2 b \rho_1$$

och vi erhåller den nya tätheten till

$$\rho = \frac{M}{\pi (R + \Delta R)^2 b} = \frac{1}{(1 + \varepsilon)^2} \rho_1$$

Trycket ges av

$$p = K_v \left(\frac{\rho}{\rho_{v0}} - 1 \right).$$

Insatt erhålles

$$p = f p_1$$

där

$$f = \frac{A}{1 + \frac{a}{2R} + A}$$

$$A = \frac{a}{R} \frac{E}{2K_v}$$

Vi jämför nu tre olika materialval och tjockleksval enligt tabell 3:1 vid samma innerradie $R = 140$ mm.

Tabell 3:1. Trycksänkning vid olika materialval

Material	E (GPa)	a (mm)	f
Polyetylen	2.725	18	0.08
Dural	70	10	0.5
Stål	200	10	0.75

Vi valde, vid tillverkningen av fallapparaten, ett polyetylenrör vilket var mindre lyckat. Ett mycket bättre val hade varit ett glasfiberarmerat plaströr!

3.4 Tvådimensionell simulering med polyetylenrör

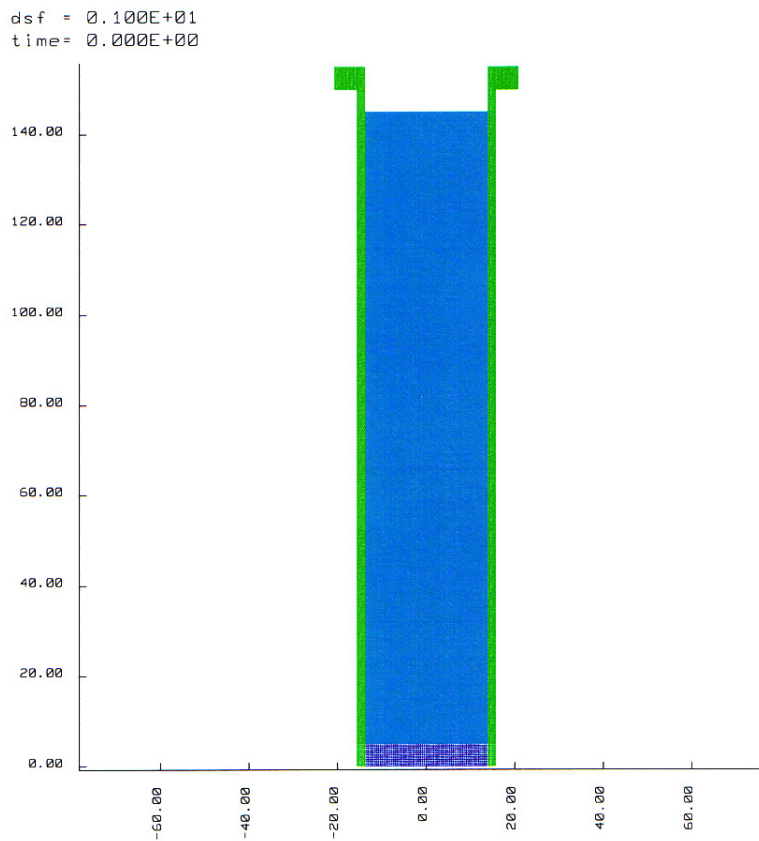
Vid den tvådimensionella simuleringen har vi ett polyetylenrör med innerdiametern 140 mm och tjockleken 18 mm. Materialdata för polyetylenen är:

$$\rho_{p0} = 954 \text{ kg/m}^3$$

$$E = 2.725 \text{ GPa}$$

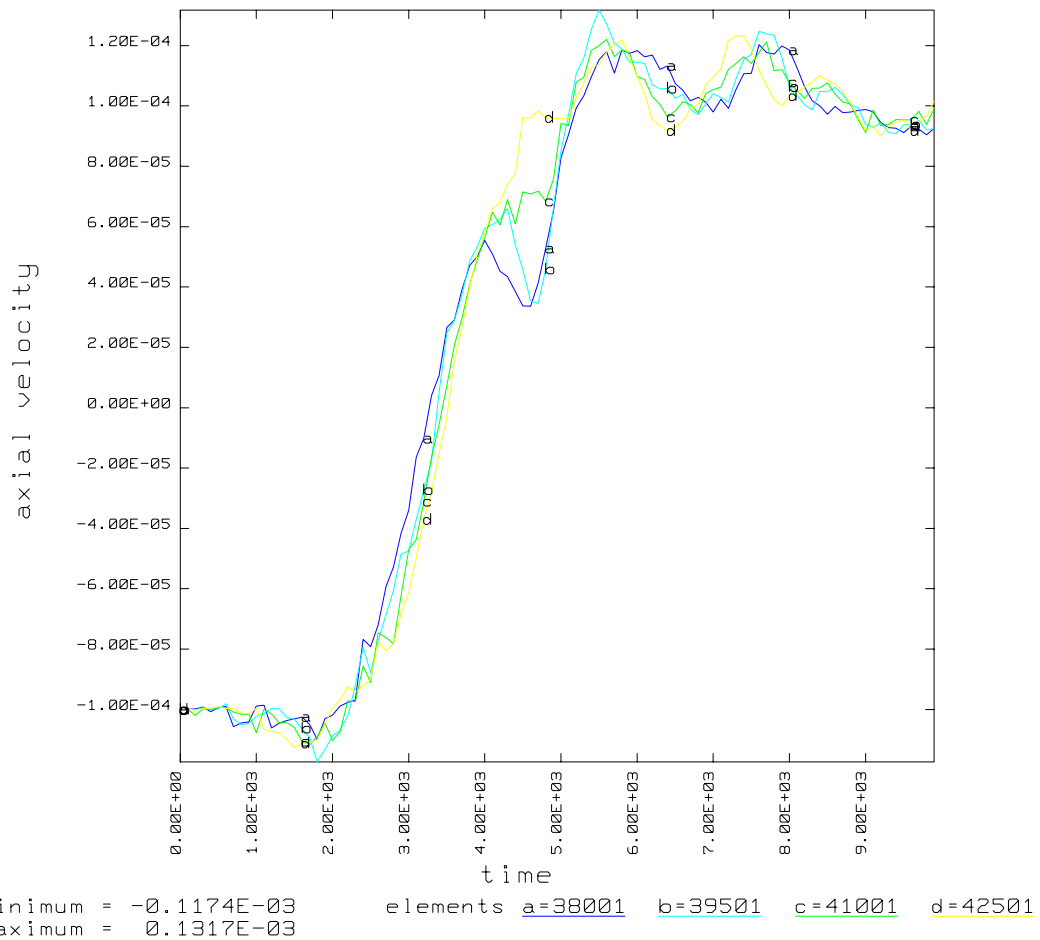
$$\nu = 0.4$$

Polyetylenrörets totala höjd är 155 cm. I dess nedre del är invändigt en aluminiumplatta, 50 mm tjock, monterad. Röret är fyllt med vatten till en höjd av 140 cm. I rörets övre del är en polyetylenring 50 mm gånger 50 mm monterad för att styva upp rörets övre del. Vattnet och aluminiumet (dural) är modellerat som vid den endimensionella simuleringen. Rörets ytteryta och den fria vattenytan är trycksatta till 1 atm. Vattnets starttryck är 1 atm. Vattnet med behållare faller med en hastighet av 1 m/s när det träffar ett stelt underlag. Geometrin framgår av figur 3:5



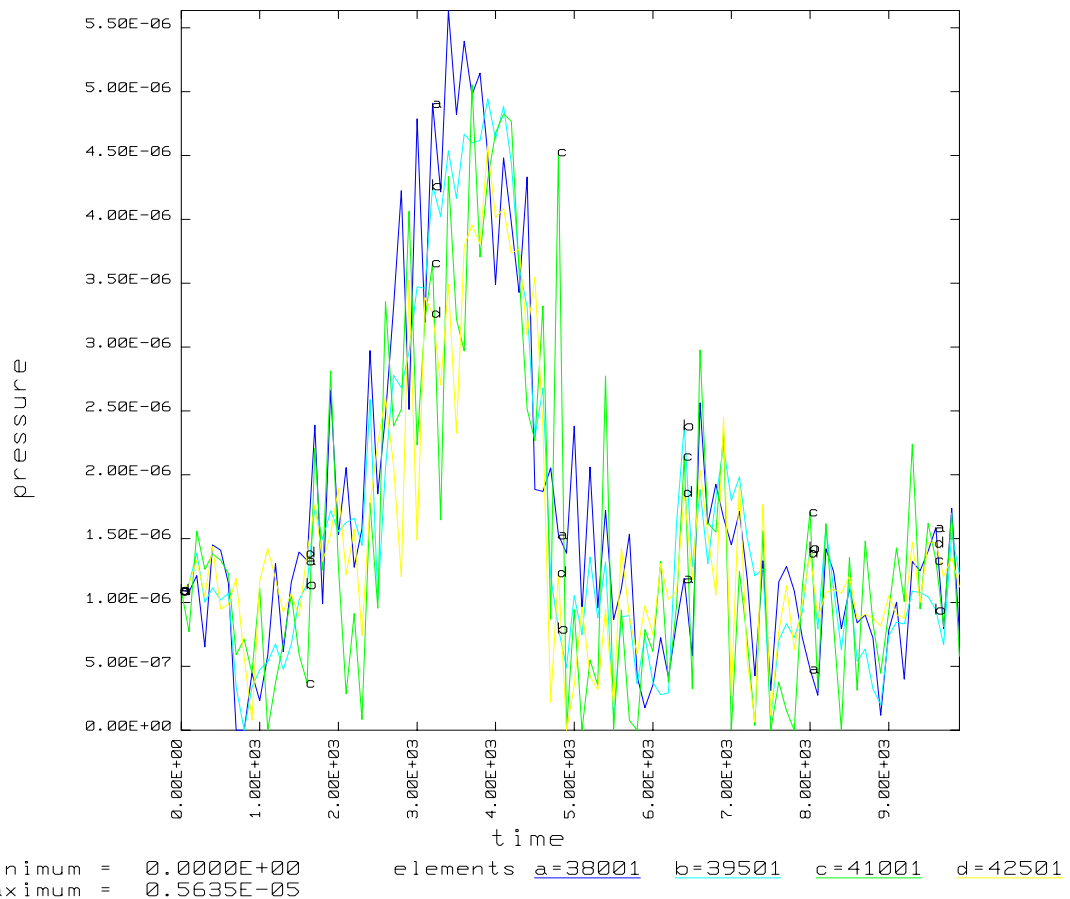
Figur 3:5. Geometri vid tvådimensionell simulering

Vattenhastigheten på djupet 4 dm (a), 3 dm (b), 2 dm (c) och 1 dm (d) visas i figur 3:6.
Hastighetsskala $10^{-4} \text{ cm}/\mu\text{s} = 1 \text{ m/s}$.



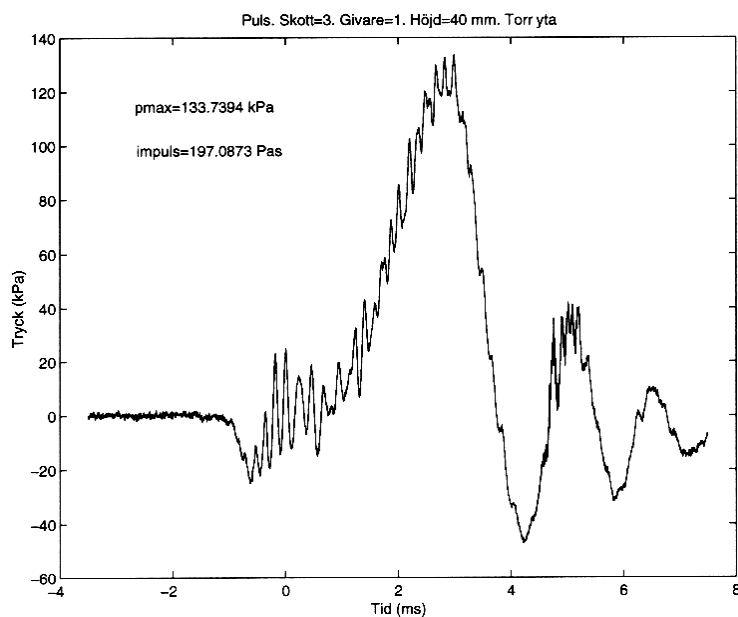
Figur 3:6. Vattenhastigheten vid tvådimensionell simulering

Vi ser hur hastigheten ändras från -1 m/s till 1 m/s under mer än 2 ms vilket är en faktor 10 längre än vid det stela röret. Hastighetsändringen sker också relativt lika i hela röret. Tryckförloppen vid samma djup ges i figur 3:7



Figur 3:7. Tryckförloppet på olika djup

Tryckpulsernas varaktighet är ca 2 ms med visst beroende av djupet men inte alls som vid det stela röret. Maximala tryckändringen är ca 3 bar jämfört med 15 bar vid det stela röret. Uppskattningen i avsnitt 3 indikerade en trycksänkning till 1.5 bar vilket stämmer bra med mätningar, se ref. 1. Pulsformen i figur 3:7 stämmer bra med uppmätta pulsformer. I figur 3:8 visas tryckpulsen vid en fallhöjd av 40 mm där mätpunkten ligger 1 dm under ytan.



Figur 3:8. Uppmätt tryckpuls

3.5 Sammanfattning

Simuleringarna visar vikten av att använda ett styvt rör i fallapparaten. Det använda polyetylenröret är för mjukt skulle kunna bytas ut mot ett glasfiberarmerat plaströr. Med ett sådant rör kommer pulsens varaktighet att kunna styras bättre enligt den ideala beskrivningen.

För att hindra att flera tryckpulser uppkommer, i det fallet att endast en puls önskas, måste fallapparaten utrustas med ett kilarrangemang som hindrar behållaren att ånyo falla ner efter studs mot underlaget. Material för detta arrangemang har tagits fram.

4 Biologisk skadevärderingsmodell

Försöken har godkänts av Djurförsöksetiska nämnden i Umeå (Dnr: A89-03).

Vår avsikt var att exponera sövda djur för tryckvågor under vatten och att mäta hjärnaktivitet med EEG under försöket, avliva djuret och tillvarata material från råttan för vidare biokemiska analyser.

Ursprungligen hade vi tänkt använda gasnarkos och avstänga råttan från andning (och narkos) under dykningen, som då beräknades ta upp till 15 sekunder. Vi har i flera metodexperiment prövat olika delar av metodiken.

Genomgående har djurets tillstånd övervakats med en pulsoximeter, som mäter puls och blodets syresättning.

4.1 Narkosmetod och syresättning

Vi började med att använda gasnarkos (Isofluran i öppen mask). Eftersom detta kräver speciell utrustning och visade sig omständligt bytte vi till intraperitoneal narkos (narkosmedlet sprutas in i bukhålan), vilket visade sig fungera mycket bra.

En sensor för syremättnad i blodet (saturation) och pulsregistrering fästes mot en av bakbenets fotsulor och fästes med tejp och kopplades till mätapparaten (8600V Series Veterinary Pulse Oximeter, Nonin Medical Inc., MN, USA).

Vi experimenterade med olika "masker" för att förhindra att råttan skulle dra i sig vatten medan den var sövd. Det som fungerade bäst var avklippta tummar från operationshandskar. Denna lämnas först öppen framför nosen, och försluts först direkt före dykningen.

Då råttan hindrades från att andas visade det sig att dess syresättning försämrades inom 20 sekunder. Detta bedömdes som en oönskad osäkerhet inför tolkningen av resultaten från exponeringsförsöken.

I ett första försök att åtgärda rättornas relativa syrebrist fick de andas ren syrgas i någon minut innan andningen avstängdes. Detta förlängde avsevärt tiden till syrebrist.

En ytterligare förbättring var när vi i stället införde ett öppet andningssystem, där en kateter fästes vid råttans huvud och mynnade inne i "masken". Genom katetern leddes syrgas (0,5 l/min) som passerade råttans nos och fick pysa ut genom pälsen vid maskkanten. Luftflöde provades också, men gav något sämre syresättningsvärden.

För att råttan inte skulle bli nedkyld placerades den, efter nedsövning och under alla tider då det var möjligt, på en värmedyna som styrdes av en temperatursensor i ändtarmen (CMA/150 Temperature Controller CMA Microdialysis AB, Solna, Sweden)

4.2 EEG - hjärnaktivitetsmätning

Fyra EEG-elektroder syddes fast i skinnet över skallen tillsammans med två referenselektroder. Sladdarna från elektroderna kopplades till en EEG-apparat (Nihon Kohden Corporation model EEG-7209, Japan) och EEG registrerades på papper.

Det visade sig vara möjligt att registrera EEG även under vatten, men att EEG:t stördes under ca 10 sekunder av varje förflyttning av råttan, inklusive rörets fall.

5 Exponeringsexperiment

En serie exponeringsexperiment har påbörjats men inte helt slutförts under 2003. Syftet var att se vilket utfall som tryckvågsexponeringen skulle ge på EEG och ett antal andra parametrar.

5.1 Material och metod

Råttor, Sprague-Dawley, honor, vikt ca 200 gram har använts. Den kompletta serien skall omfatta 10 exponerade och 10 kontroller.

Råttorna vägdes och sövdes med en injektion in i bukhålan av en blandning av Hypnorm®, Midazolam® och vatten (1+1+2), 0,24 ml per 100 gram BM. Därefter gavs Hypnorm 0,02 ml per 100 gram kroppsvikt var 30:e minut.

En elektronisk termometer fördes in rektalt och djuren placerades på värmedyna. EEG-elektroder (4 + 2 referens) syddes fast i huden. Pulsoximeterns givare fästes på en fot med tejp.

Syrgaskateter syddes fast så att den mynnade vid nosen med flödet 0,5 liter/min. Råttan lades på råttfixturen och spändes fast med ett nät. Sladdarna fästes på fixturen. Huvan, en tumme från en Biogel-handske, sattes på huvudet men utan att täcka öronen. Huvan knöts ihop framför nosen

Röret fylldes med rumstempererat vatten, upp till 5 cm ifrån övre kanten. Röret höjdes med hjälp av en galvaniserad vantskruv till 3 cm över fundamentet. Detta gav, vid fallet, en initial tryckvåg (maxtryck) på ca 180 kPa.

Vi valde att använda en relativt hög belastning, eftersom vi inte visste om den aktuella typen av belastning skulle ge några påvisbara förändringar, och i så fall av vilka parametrar.

Djuren lottades till exponering eller kontroll. Kontrolldjuren behandlades på samma sätt, som de exponerade, med undantag för att röret aldrig släpptes ner.

Råttan nedsänktes så att dess nos var 20 cm under vattenytan. Röret släpptes efter 30 sekunder. Därefter fick råttan vara kvar ytterligare 60 sekunder under vatten, för att EEG-registreringen skulle hinna stabilisera sig.

Därefter lyftes råttan upp, masken togs bort och andningen kontrollerades. Efter 5 minuter lossades råttan från fixturen och överfördes till värmedynan. EEG-registreringen fortsatt ytterligare 30 minuter, kontinuerligt de första 10 min därefter var 5:e minut.

Därefter avlivades djuret med en dubbeldos av narkosblandningen och därefter utblödning - undre hålvenen (vena cava inferior) klipptes av.

Efter avlivning tillvaratogs blod (från vena cava inferior) för analys av proteinet S-100. Hjärnan, höger lunga och blindtarmen (caecum) tillvaratogs och fixerades (4% formalin och därefter i sockros 10%), för senare nedfrysning och snittning för histopatologisk undersökning.

Lungor, bukhinna och tarm inspekterades för tecken på blödning.

5.2 Preliminära resultat

Experiment på 4 exponerade och 4 kontrolldjur har genomförts.

Hjärtfrekvensen var i stor sett opåverkad i båda grupperna.
God syresättning bibehölls i båda grupperna.

EEG-aktiviteten före exponeringen var lika i grupperna.

De exponerade råttorna visade inom 90 sekunder en övergång till ett EEG-mönster med sänkt frekvens "slow frequency range pattern". Förändringarna gick över på några minuter, utom i ett fall då förändringarna bestod under 30-minutersperioden.

Ingen av kontroll-djuren visade någon EEG-förändring under tiden kring exponeringen, men ett djur visade sänkt frekvens mot slutet av 30-minutersperioden.

De observerade EEG-förändringarna tolkas som djuren (i vaket tillstånd – dvs. om de ej varit sövda) skulle ha varit kraftigt omtöcknade, men inte medvetslösa.

Inga traditionella tryckskador på luftförande organ har observerats.

Övriga analyser skall genomföras när experimentserien är komplett.

5.3 Diskussion

Kompleta data-analyser måste naturligtvis vänta tills alla experiment har genomförts. Man kan dock notera att det förefaller finnas en påverkan på hjärnan, eftersom man fick en EEG-påverkan i alla hittills exponerade djur.

I övrigt har experimentmodellen fungerat väl. Även om stötrörets beteende avviker från ideala förhållande har det producerat en reproducerbar puls, av tillräcklig amplitud och avgränsning i tid.

En uppenbar fördel med de förändringar som införts i metoden för narkos och syresättning av djuret är att tiden under vatten nu kan utsträckas betydligt. Detta kan vara avgörande om man senare vill förskjuta fokus mot buller, snarare än enstaka tryckpulser. Bullerexponering torde fordra längre exponeringstid. Metoden är också anpassad för att djuren i framtiden skall kunna väckas efter narkos, vilket är nödvändigt för vissa biokemiska tester och om man vill studera beteendeförändringar.

6 Kommande inriktning

Under 2004 planeras komplettering av den första experimentserien och analys av denna. I detta läge är det intressant att se vilka parametrar som i huvud taget ger något utslag och hur dessa utslag i så fall skall tolkas.

Vi planerar sedan att använda denna experimentmodell, med ev. modifieringar, för att studera dos-respons-förhållandet för tryckvåg.

I samverkan med hörsselforskare vid KI kommer vi att aktualisera frågeställningarna om undervattensbullers påverkan på hörsel- och balansorganen.

På direkt önskemål av Försvarmakten kommer vi också att utreda möjligheterna till simulering av tryckvågsutbredning i kustvatten.

Referenser

Gennser M. FOA Memo Nr: 99-4556/1

Bullerskaderisker vid Dykeriarbete - En Litteraturstudie , FOA Navalmedicin, 130 61 Hårsfjärden

Hallquist JO. "DYNA2D-An explicit finite element and finite difference code for axisymmetric and plane strain calculations (User's Guide)", University of California, Lawrence Livermore National Laboratory, Report UCRL-52429, March 1978.

Suneson A. FOA 00-1182/L FOA Memo Vapentraumatologi FoT 99:21.6 2000-03-23 Skaderiskkriterier vid undervattensexlosion - En litteraturstudie. Enheten för experimentell traumatologi, Försvarsmedicinska institutionen, Avdelningen för Humanvetenskap, Försvarets forskningsanstalt, Södersjukhuset, 118 83 Stockholm