



CHALMERS



Aquamatic avgasluddämpning

Potentiell NVH förbättring för Volvo Pentas marina dieselmotorer med Aquamatic-drev

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Maskinteknik

Jonathan Bodén & Marcus Führ

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2026
www.chalmers.se

BACHELOR'S THESIS 2026

Aquamatic avgasljuddämpning

Konceptutveckling av nuvarande avgassystem för att förbättra den övergripande båtupplevelse

JONATHAN BODÉN
MARCUS FÜHR



CHALMERS

Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2026

Aquamatic avgasljuddämpning
Potentiell NVH förbättring för Volvo Pentas marina dieselmotorer med Aquamatic-
drev
JONATHAN BODÉN
MARCUS FÜHR

© JONATHAN BODÉN
MARCUS FÜHR, 2026.

Supervisor: Hans Olausson & Marcus Bader, Volvo Penta
Examiner: Rickard Everyd Bensow, Professor (N2), Marin teknik, Mechanical Engineering

Bachelor's Thesis 2026
Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Telephone +46 31 772 1000

Cover: Image of a Volvo Penta constructed Aquamatic D4 engine.

Typeset in L^AT_EX
Printed by Chalmers Reproservice
Göteborg, Sverige 2026

Abstract

Volvo Penta is a global provider of marine and industrial propulsion- as well as power generation systems. Among its products are high-speed diesel engines designed for small to medium-sized commercial and recreational vessels. These engine platforms are constantly being further developed and are currently undergoing a Noise, Vibration and Harshness (NVH) development project in response to increasing demands for environmental sustainability and acoustic comfort in marine applications. This bachelor's thesis is a small part of the NVH project and aims to improve overall acoustic comfort through an enhanced exhaust system.

A wide range of conceptual solutions were generated and systematically assessed in terms of technical possibility, performance potential, and applicability within given constraints. Through an iterative design process combining research, analysis, practical experiences onboard, and evaluation, two concepts were identified as candidates for further development.

The development phase involved the creation of detailed CAD models, alongside functional analyses to ensure the concepts met all requirements and constraints. Both solutions use a secondary exhaust outlet and modified dimensions on the existing pipes to reduce unwanted noise and vibration.

At the conclusion of the project, the developed concepts, together with supporting analysis and recommendations, were presented to Volvo Penta for further refinement and physical testing. The proposed concepts will hopefully give Volvo Penta a competitive edge in acoustic comfort on the inboard marine engine market.

Förord

Detta examensarbete har genomförts som en del av högskoleingenjörsprogrammet maskinteknik vid Chalmers tekniska högskola i samarbete med Volvo Penta. Arbetet har gett oss möjlighet att tillämpa teoretiska kunskaper i en industriell miljö och även bidra med nya koncept, lösningar och analyser som en del av ett större projekt som utförs på Volvo Penta.

Först och främst vill vi rikta ett stort tack till Hans Olausson för möjligheten att genomföra detta projekt på Volvo Penta. Att få arbeta på plats i deras lokaler, sida vid sida med deras ingenjörer, har varit både lärorikt och värdefullt. Hans expertis och allmänbildning inom ämnet har även varit till stor nytta då vi, med hans hjälp, har kunnat bredda våra kunskaper och fördjupa oss inom ämnet.

Ett speciellt tack vill vi rikta till Marcus Bader, som varit en viktig drivkraft i vårt projekt. Marcus har varit ovärderlig i vårt arbete genom sin ständiga tillgänglighet för att bolla idéer, sitt engagemang och sin generositet i att dela med sig av kunskap och erfarenheter samt nya fynd som gynnat projektet.

Ytterligare ett tack vill vi rikta till vår examinator från Chalmers, Rickard Everyd Bensow, som visat sig väldigt intresserad av vårt arbete och bidragit med hjälp kring de Chalmers-riktade och administrativa frågorna som uppstått under projektets gång.

Avslutningsvis vill vi tacka alla kollegor på Volvo Penta som har bidragit till en trivsamt arbetsmiljö och till många intressanta och lärorika diskussioner. Dessutom för lite extra hjälp med studierna längs vägen.

Tack för ert förtroende!

Jonathan Bodén & Marcus Führ, Göteborg, 06 2026

Akronymförteckning

Nedan finns en lista över akronymer som har används i rapporten i alfabetisk ordning.

CAD	Computer-Aided Design
CWES	Clear wake exhaust system
IPS	Inboard Performance system
NVH	Noise, vibration and harshness
SBE	Set-based engineering

Innehåll

Acronymförteckning	ix
Figurförteckning	xiii
Tabellförteckning	xv
1 Inledning	1
1.1 Arbetets bakgrund	1
1.2 Problemdefinition	1
1.3 Precisering av frågeställning	2
1.4 Syfte	3
1.5 Avgränsningar	3
1.6 Kravspecifikation	4
2 Teori	7
2.1 Avgassystem	7
2.1.1 Risern	8
2.1.2 Bockhornet	8
2.1.3 Offeranod	8
2.2 Varianter på ljuddämpning	8
2.3 Tryck	9
3 Metod	11
3.1 Förundersökning	11
3.2 Konceptgenerering	11
3.3 Detaljerad design	12
3.4 Verifiering av koncept	12
3.5 Diskussion, slutsats och vidareutveckling	12
4 Konceptutveckling	13
4.1 Patentsökning och referenslösningar	13
4.1.1 Exhaust gas idle relief system	13
4.1.2 Exhaust relief system	14
4.1.3 Water-injected exhaust system	15
4.1.4 Clear wake exhaust system	16
4.2 Konceptgenerering	17
4.2.1 Koncept 1	18

4.2.2	Koncept 2	18
4.2.3	Koncept 3	19
4.2.4	Koncept 4	20
4.2.5	Koncept 5	21
4.3	Utvärdering av genererade koncept	22
5	Detaljkonstruktion	23
5.1	Detaljerad design	23
5.2	Kriterieuppfyllelse	27
5.3	Prototyp	27
6	Diskussion	29
7	Slutsats och Framtida rekommendationer	33
7.1	Slutsats	33
7.2	Vidareutveckling av koncept	34
7.2.1	Experimentell tryckreglering och ventiloptimering	34
7.2.2	Materialoptimering och korrosionsskydd	34
7.2.3	Installationsanpassning och geometrisk utformning	35
7.3	Slutord	35
	Litteraturförteckning	37
A	Appendix 1	I

Figurer

2.1	Avgassystem: Riser & bockhorn	7
2.2	Vattenpelaren i bockhornet innan och efter avgasttryck	8
4.1	Exhaust gas idle relief system av Jaszweski et al. (2014)	14
4.2	Exhaust relief system av Freund et al. (1985)	15
4.3	Water-injected exhaust system av Stuart (1978)	16
4.4	Clear wake exhaust system av Volvo Penta	17
4.5	Illustration av koncept 1	18
4.6	Illustration av koncept 2	19
4.7	Illustration av koncept 3	20
4.8	Illustration av koncept 4	21
4.9	Illustration av koncept 5	21
4.10	Skiss av potentiella prototyper för koncept 4 och koncept 5	22
5.1	CAD-modell av koncept 4	24
5.2	CAD-modell av koncept 4 utplacerad med motor	25
5.3	CAD-modell av koncept 5	26
5.4	CAD-modell av koncept 5 utplacerad med motor	26

Tabeller

1.1	Kravspecifikation för avgassystemet	5
5.1	Komponentlista för koncept 4	28
A.1	Motorparametrar vid olika driftpunkter	I

1

Inledning

Volvo Penta utvecklar marina motorer där ökade krav på komfort, miljöprestanda och ljudnivåer ställer nya krav på avgassystemens utformning. I deras dieselmotorer finns potential till förbättring, särskilt vid tomgång, då avgaser släpps ut under vattenytan och bildar bubblor som genererar störande ljud.

Detta arbete syftar till att analysera de fysikaliska mekanismerna bakom ljudgenereringen samt att undersöka möjliga tekniska lösningar för att reducera bullret. Med utgångspunkt i identifierade kundbehov och kravspecifikationer utvecklas och utvärderas koncept för hur avgaser kan frigges på ett sätt som minskar ljudnivån utan att påverka motorns funktion och prestanda negativt.

1.1 Arbetets bakgrund

Volvo Penta är ett svenskt företag och verkar som ett dotterbolag inom Volvo Group. Företaget är tillverkare och leverantör av marina och industriella motorer samt kraftsystem med verksamhet som sträcker sig över hela världen. De tillhandahåller ett brett program av motorer och kompletta drivline-lösningar för marina applikationer.

Modellerna av Volvo Pentas dieselmotorer ska nu genomgå en ny uppdatering som består av tre delar. En av delarna handlar om noise, vibration och harshness (NVH), vilket detta examensarbete riktar sig in på. Avdelningen där examensarbetet har utförst har fokus på två av Volvo Pentas mindre varianter av dieselmotorer, D4 och D6. Dessa kommer att vara de motorer som arbetet studerar och fokuserar på.

1.2 Problemdefinition

I takt med ökande krav på miljöprestanda, akustisk komfort och hållbarhet inom marina miljöer har bullerreducering blivit ett område av stor betydelse i moderna båtar. Ljudnivåer från marina drivsystem påverkar användarupplevelsen såväl som den omkringliggande miljön.

Avgaserna från Volvo Pentas dieselmotorer frigges i nuläget i vattnet under ytan och skapar luftbubblor som under drift fördelas och skjuts bort från båten genom strömmarna som bildas av propellern. Vid tomgångskörning flyter istället avgaserna upp till ytan ovanför utloppet som gör att vattnet plaskar vilket skapar buller och

vibrationer ombord. Detta förstärks speciellt för båtar med badbrygga då bubblorna smäller i bryggan och skapar ytterligare buller och vibrationer över hela båten. Ytterligare ett problem är ljudnivåerna som uppstår från avgaserna under drift. I nuläget finns det ingenting i systemet vars huvudsyfte är att dämpa detta ljud, vilket leder till en obekväm upplevelse även under drift. Ljudreducering är ett problem som är viktigt att lösa för att Volvo Pentas båtmotorer ska vara konkurrenskraftiga på marknaden.

Det finns liknande teknik på marknaden som redan har löst detta problem. Till exempel har utombordare, som används på samma typer av båtar, annorlunda motordesign jämfört med inombordare. De förhindrar stora bubblor genom att skifta frigörelsen av avgaserna ovanför och under ytan beroende på om motorn går på tomgång eller är i vanlig drift. På inombordare återstår detta problem än idag, dels för att det inte varit nödvändigt att lösa då passagerare befinner sig längre ifrån motorn än på utombordare.

Volvo Penta har även ett eget system som heter Clear Wake Exhaust System (CWES) som är ett tilläggsystem till vissa av deras större Inboard Performance System (IPS) motorer. CWES använder, likt på utombordare, ett system för att reglera ifall avgaserna ska frigges ovanför eller under ytan. Detta görs genom en elektrisk ventil som är öppen eller stängd beroende på motortemperatur och varvtal.

1.3 Preciserings av frågeställning

Huvudfråga

- Hur kan avgaserna från Volvo Pentas dieselmotorer frigges vid tomgång och under vanlig drift på ett sätt som minskar buller utan att påverka motorns funktion eller båtens prestanda negativt?

Delfrågor

- Vilka fysikaliska mekanismer orsakar ljud vid avgasutsläpp i vatten vid tomgång?
- Vilka konstruktionsmodeller används idag för att minska avgasrelaterat buller i marina miljöer?
- Vilka metoder är tekniskt möjliga att implementera utan större ingrepp i motorns befintliga system?
- Vilka begränsningar finns gällande utrymme, temperatur, tryck och material?
- Vilket koncept ger störst potential för bullerreducering vid tomgång?

Hypotesformulering

- Buller vid tomgång minskar om avgaserna leds ovanför vattenytan, eftersom bubbelbildningen då elimineras.
- En ventillösning är tekniskt möjlig att implementera på motorerna utan större modifieringar.
- Buller orsakat av bubblor vid ytan är den dominerande ljudkällan vid tomgång.

1.4 Syfte

Syftet är att framställa ett alternativt sätt att frige avgaserna från Volvo Pentas dieselmotorer under både tomgång och vanlig drift med målet att reducera det upplevda ljudet. Uppdraget ska resultera i ett tekniskt underlag och förslag på en lösning som ska bidra till en tystare och mer komfortabel upplevelse.

1.5 Avgränsningar

För att säkerställa att projektet genomförs inom den givna tid- och resursramen fastställs följande avgränsningar. Detta klargör projektets omfattning och vad som faller utanför uppdraget.

Avgränsningar kopplade till ljudkällor

Projektet fokuserar endast på ljud som genereras av avgaserna, inklusive:

- Ljud från gasflödet när avgaserna lämnar systemet
- Ljud från bubblor som uppstår när avgaserna når vattenytan under tomgång

Projektet omfattar inte reduktion av:

- Mekaniskt motorljud
- Ljud som uppstår i motorns komponenter
- Vibrationer mellan motor, drivlina och båtens struktur

Avgränsningar kopplade till system och komponenter

- Endast Volvo Pentas D4 och D6 motorer kommer att analyseras
- Endast avgassystemets utloppssektion (från turbo till avgasmynning) kommer att analyseras

Avgränsningar kopplade till lösningar

- Projektet syftar att utveckla en prototyp och inte en fullständig kommersiell produkt
- En fysisk prototyp kan inte med säkerhet framställas under examenarbetets period på grund av Volvo Pentas egen tidsplan
- Slutgiltiga tester kan inte med säkerhet göras på grund av Volvo Pentas egen tidsplan
- Examensarbetarnas tekniska kunskaper möjliggör inte avancerade flödesanalyser och beräkning för hela systemet

1.6 Kravspecifikation

Syftet med kravspecifikationen är att definiera olika krav för en lösning som ska, enligt huvudkravet, minska den totala ljudnivån från avgassystemet vid tomgång och under drift utan att påverka övriga motoregenskaper negativt. Kraven bestämdes under introduktionen till arbetet tillsammans med projektansvarige och redovisas i tabell 3.2.

Kraven är kategoriserade i tre grupper vars delar innefattar funktionella-, icke-funktionella- och tekniska krav.

- **Funktionella krav (KR-FUN-00X)** beskriver konkreta funktioner, beteenden eller processer som systemet måste kunna utföra för att uppfylla sitt syfte
- **Icke-funktionella krav (KR-NF-00X)** beskriver kvaliteter som påverkar systemets prestanda, användbarhet eller egenskaper, men inte en specifik funktion
- **Tekniska krav (KR-TEK-00X)** beskriver teknologier, gränssnitt, standarder, material, verktyg eller tekniska begränsningar som lösningen måste anpassas till.

Tabellen är organiserad genom att förklara bakgrunden för kravet och dess motiv samt ett exempel på en metod för att testa och verifiera att kravet uppfylls.

Kravnummer	Kravnamn	Bakgrund	Motiv	Verifiering
KR-FUN-001	Ljudreducering (Huvudkrav)	Systemet ska minska den totala ljudnivån (dB) från avgassystemet vid tomgång	Öka komfort och minska ljudutsläpp	Ljudmätning enligt standardiserad metod före/efter intallation
KR-FUN-002	Minska bubbelbildning	Lösningen ska reducera bubbelbildning under tomgång utan att försämra motorens prestanda under drift	Minska buller	Visuell test under tomgång på testcenter samt provkörning i vatten
KR-FUN-003	Kompatibilitet med nuvarande design	Systemet ska passa och fungera med nuvarande Aquamatic-design utan att kräva större ombyggnad	Bibehålla designen på befintliga båtmodeller	CAD-kontroll, Fysisk passforms-verifiering samt installeringsprov
KR-FUN-004	Enkel installation	Installationen ska kunna utföras av standardutbildade servicetekniker utan specialverktyg	Underlätta monteringen	Installationstest
KR-FUN-005	Säkerhetsfunktion vid systemfel	Om systemet slutar fungera ska det inte orsaka skada på motor eller båt, samt inte tillåta läckage	Maximera säkerhet samt minimera kostnad och säkerställa drift	Fail-safe test, felkod-simulering
KR-NF-001	Tålighet mot havsvatten	Lösningen ska tåla långvarig exponering för havsvatten, salt, fukt och marina temperaturvariationer	Säkerställa lång hållbarhet i marina miljöer	Livslängdsimulering
KR-NF-002	Kostnadseffektiv produktion	Komponentkostnaden ska hållas inom definierad målbudget (specifierad av projektägare)	Hålla sig inom ramarna för projektets- samt kundernas budget	Kostnadsanalys i samarbete med projektansvarig
KR-NF-003	Inga nya ljud eller fenomen	Lösningen får inte skapa nya misstjud, vibrationer, resonanser eller hydro-dynamiska fenomen	Minska buller	NVH-mätning och funktionstest
KR-TEK-001	Materialkrav	Material ska klara extrem avgastemperatur över 400 °C likaväl som marin miljö, korrosion och utomhustemperatur från -20 °C till 30 °C	Säkerställa lång hållbarhet i marina miljöer	Materialprov samt temperaturcykling
KR-TEK-002	Gränssnitt	Systemet ska passa befintliga infästningspunkter, slangdimensioner och flödeskrav	Underlätta monteringen	CAD-kontroll och mätning på fysisk prototyp

Tabell 1.1: Kravspecifikation för avgassystemet

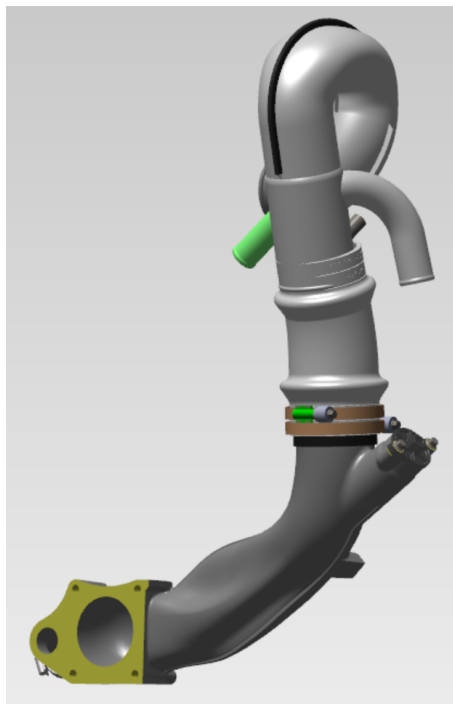
2

Teori

Detta kapitel har som syfte att ge läsaren en grundläggande förståelse kring nödvändig kunskap kring motorkomponenter samt de teorier och grundläggande beräkningar som använts i metoden för att generera och eliminera de olika koncepten. Varje koncept behöver kontrolleras tekniskt då funktionaliteten på designen kräver en kompatibilitet med motorns egenskaper i samband med de fysiska egenskaperna för havsvatten och avgaser.

2.1 Avgassystem

Avgassystemen på Volvo Pentas olika motorerna varierar i storlek och egenskaper. Då arbetet utförts på en avdelning som arbetar med D4- och D6-motorerna kommer endast dessa modeller beskrivas i detalj. Nedan syns en modellering av det nuvarande avgassystemet som används. Systemet består av en riser som avgaserna först leds in. Under risern sitter blandaren, där vatten tillförs in i systemet för att kyla avgaserna. Därefter leds avgaserna och vattnet genom bockhornet till utloppet.



Figur 2.1: Avgassystem: Riser & bockhorn

2.1.1 Risern

Risern är en komponent som nämns i rapporten men är inget huvudfokus i projektet. Den sitter i början av avgassystemet och har som sin viktigaste uppgift att förhindra vatteninträngning i motorn. Detta är möjligt på grund av dess geometri och sin höga position över vattenytan.

2.1.2 Bockhornet

Bockhornet är den del som placeras under risern och kännetecknas av sin böjda form, likt ett horn. Efter att avgaserna blandas med sjövattnen leds den kylda vatten- och avgasblandningen genom bockhornet ut i havet. Genom sin utformning bidrar bockhornet till att skapa en effektiv flödesväg för avgaserna, samtidigt som den minskar risken att vatten tränger tillbaka mot motorn.

Då bockhornet är ett öppet rör ut till havet så befinner det sig en vattenpelare i rørsystemet som når upp till vattenlinjen. Detta innebär att avgaserna behöver ett visst tryck för att preja bort vattenmassan och ledas vidare ut ur avgassystemet. Detta är en viktig del som kommer diskuteras vidare i rapporten.

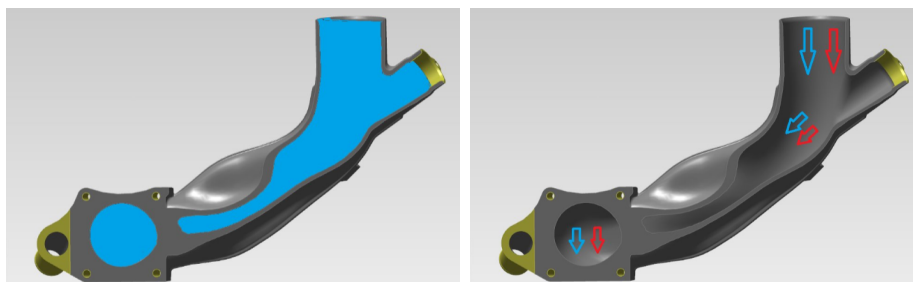


Figure 2.2: Vattenpelaren i bockhornet innan och efter avgastryck

2.1.3 Offeranod

På bockhornet sitter ett utskott som innehåller en offeranod. Det är en viktig komponent för att behålla en hög hållbarhet på bockhornet. En offeranod är en ädel metallbit som monteras på en konstruktion av mindre ädelt material. Den fungerar genom att korrodera (offras) istället för huvudmaterialet, vilket skyddar konstruktionen mot rost. Detta sker eftersom offeranoden har lägre elektropotential och därför angrips först i en elektrokemisk process.

2.2 Varianter på ljuddämpning

Ljudet som rör sig genom avgasrören i inombordsmotorer uppstår som en direkt konsekvens av förbränningsprocessen i varje cylinder. När bränsle-luftblandningen antänds i förbränningsrummet sker en mycket snabb tryckökning och skapar en tryckpuls som skickas ut genom avgasventilen när den öppnar. Dessa tryckpulser

färdas genom avgassystemets grenrör och bildar det ljud som uppfattas som buller genom kombinationen av tryckvariationer, turbulens i rören och akustiska resonanser. Beroende på systemets geometri och eventuella tilläggssystem kan ljudet förstärkas eller förminskas. Genom att experimentera med systemets geometri och egenskaper som uppstår från tilläggssystem, så som ljuddämpare, så är det möjligt att förminska det upplevda ljudet. Detta går att åstadkomma på olika sätt baserat på motortyp.

I det stora hela är avgassystemen på båtar uppdelade i “wet-exhaust” och “dry-exhaust”. I ett wet-exhaust system, vilket är det befintliga systemet som används på Volvo Pentas dieselmotorer, blandas havsvatten in med avgaserna i syfte att kyla avgaserna effektivt med flera hundra grader. Detta gör även så att gasvolymen minskar vilket i sin tur minskar flödes hastigheten och tryckpulserna vilket sedan dämpar bullret ordentligt[3].

I ett dry-exhaust system, som oftast förekommer i bilar, används andra sätt för att dämpa ljudet. De tre vanligaste typerna är kammarbaserad dämpare, absorptionsdämpare och resonansdämpare [4]. Dessa dämpar ljudet med hjälp av geometriska kaviteter och ljudisolerande material.

2.3 Tryck

Idle-relief är ett baskoncept där avgaserna delas upp i två separata ledningar. Det befintliga avgassystemet lämnas orört och används fortsatt under normal drift, där avgaserna leds ned och släpps ut under vattenytan enligt konventionell marin utformning. Mellan risern och bockhornet installeras ett kompletterande grenrör med mindre diameter än det ordinarie avgasröret. Vid låga motorvarvtal leds avgaserna genom detta sekundära rör, vilket möjliggör att en del av avgaserna kan släppas ut ovanför vattenytan.

Funktionen bygger på att avgaserna fördelas enligt tryckobalans i systemet och därmed följer den väg som erbjuder lägst totalt flödesmotstånd [5]. För att detta ska ske krävs att det sekundära avgasröret dimensioneras så att dess motstånd är lägre än det tryck som krävs för att förskjuta vattenpelaren i det ordinarie avgassystemet. På så sätt kommer avgaserna vid låga varvtal att föredra den nya utloppsvägen.

För att säkerställa korrekt funktion krävs därför en tryckfallsberäkning där det sekundära rörets diameter och längd fastställs så att önskad flödesfördelning uppnås utan att negativt påverka motorns drift eller avgassystemets säkerhet.

Mottrycket i ett marint avgassystem med undervattensutlopp bestäms till stor del av den hydrostatiska vattenpelaren som avgaserna måste förskjuta för att kunna lämna systemet. För en vätska i vila kan det hydrostatiska trycket beskrivas av sambandet:

$$p_{\text{hyd}} = \rho gh \quad (2.1)$$

Där ρ representerar vattnets densitet, g tyngdaccelerationen och h höjdskillnaden mellan vattenytan och utloppet. För en installation där utloppet placeras 40 centimeter under vattenytan i saltvatten ($\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$) genereras ett mottryck på cirka 4,022 kPa. Detta är det hydrostatiska tryck som avgaserna måste övervinna för att flöda genom det ordinarie systemet. För att dimensionera det sekundära röret i ett idle-relief system krävs att det totala tryckfallet i det nya röret, ΔP , underskrider det hydrostatiska trycket p_{hyd} . Tryckfallet i ett rör består av gasens flödeshastighet, viskositet samt rörets geometri och kan beräknas med Darcy–Weisbachs ekvation:

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho_{\text{gas}} v^2}{2} \quad (2.2)$$

Genom att uttrycka flödeshastigheten som en funktion av volymflödet Q ges:

$$v = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (2.3)$$

Ekvationen kan då skrivas om för att lösa ut den minsta krävda diametern D för att underskrida ett givet tryckfall:

$$D = \left(\frac{8fL\rho_{\text{gas}}Q^2}{\pi^2\Delta P} \right)^{1/5} \quad (2.4)$$

Här är gasens densitet, ρ_{gas} , en kritisk parameter som varierar med temperaturen. Enligt ideala gaslagen kan denna bestämmas genom:

$$\rho_{\text{gas}} = \frac{p}{R_{\text{specifik}}T} \quad (2.5)$$

Där p är det absoluta trycket, T temperaturen i Kelvin och R_{specifik} gaskonstanten för dieselavgaser, vilken approximeras ligga nära luftens då sammansättningen till största del består av kväve[10].

3

Metod

Detta kapitel beskriver den metodik som använts för att analysera problemområdet och utveckla en teknisk lösning. Arbetet inleds med en förundersökning där befintliga lösningar, teori och relevant data studeras. Därefter genomförs en konceptgenereringsfas baserad på Set-Based Engineering, där flera lösningsförslag utvecklas och utvärderas parallellt. De mest lovande koncepten vidareutvecklas genom detaljerad design i CAD och analyseras utifrån tekniska och akustiska krav. Slutligen utvärderas koncepten med hjälp av teoretiska analyser och tillgänglig mätdata.

3.1 Förundersökning

Arbetet inleds med ett omfattande förarbete där relevant forskning inom ämnet kartläggs för att bygga den kunskap som krävs för att utföra projektet på ett sätt som löser uppgiften och uppfyller kraven från både Volvo Penta och Chalmers. Detta görs genom att analysera referenslösningar såsom äldre patent, Volvo Pentas egna lösningar, konkurrenters lösningar samt annan relevant litteratur.

Vidare samlas nödvändig data in, exempelvis dimensioner, varvtal, tryck samt gas- och vattenflöde, som är relevant för att kunna implementera en lösning till Volvo Pentas dieselmotorer. Detta utgör en central del för att skapa en god förståelse för problemområdet.

För att skapa en praktisk förståelse för befintliga systemlösningar genomförs även besök på Volvo Pentas testområde på Krossholmen, där fysiska modeller och installationer studeras. Besök på Volvo Pentas prototypverkstad genomförs också för att öka förståelsen för hur systemet fungerar i nuläget samt för att delta i ljud- och vibrationsmätningar. Dessa mätningar används som referens vid jämförelse med framtida lösningar.

3.2 Konceptgenerering

Efter förarbetet påbörjas en fas av konceptgenerering där krav på den slutgiltiga lösningen definieras tydligt. I denna fas tillämpas Set-Based Engineering (SBE), vilket har sitt ursprung i Toyotas produktutvecklingsfilosofi.

Till skillnad från traditionell punktbaserad utveckling, där en enskild designlösning väljs tidigt i processen, bygger SBE på att flera möjliga lösningar utvecklas paral-

lellt. Dessa lösningar utvärderas successivt mot tekniska krav, begränsningar och lärdomar som uppstår under arbetets gång.

Metodiken minskar risken för suboptimerade lösningar genom att beslut kring specifika lösningar skjuts upp tills tillräcklig kunskap har uppnåtts. Initialt definieras ett brett lösningsutrymme där olika koncept och designprinciper undersöks, varefter svagare alternativ successivt sällas bort. Den slutgiltiga designen väljs först när kvarvarande alternativ tydligt uppfyller både funktionella och systemmässiga krav.

3.3 Detaljerad design

För varje kvarstående koncept genomförs vidare analyser och beräkningar för att säkerställa kompatibilitet med motorns effektivitet samt övriga tekniska och akustiska egenskaper.

De utvalda lösningarna vidareutvecklas i CAD för att visuellt utvärdera hur de integreras med det befintliga systemet. Detta möjliggör även framtagning av underlag för eventuell prototyp tillverkning.

3.4 Verifiering av koncept

Enligt Volvo Pentas övergripande planering beräknas utvecklingsarbetet kring NVH för motorerna pågå under hela 2026. Då detta examensarbete avslutas sommaren 2026 finns begränsningar i möjligheten att genomföra fysiska prototyper och slutgiltiga tester under perioden. På grund av detta baseras verifieringen huvudsakligen på teoretiska analyser, beräkningar och jämförelser med befintlig mätdata. Däremot kommer Volvo Penta, under hösten 2026, framställa en fysisk prototyp och utfärda ytterligare verifieringar enligt denna rapports designer och rekommendationer.

3.5 Diskussion, slutsats och vidareutveckling

Arbetet avslutas med en diskussion och slutsatser baserade på analyser, beräkningar och tillgängliga mätresultat. Slutsatserna relateras till de teoretiska antagandena samt de praktiska observationer som gjorts inom projektets tidsram. Vidare presenteras förslag på vidareutveckling och rekommendationer för framtida arbete inom området.

4

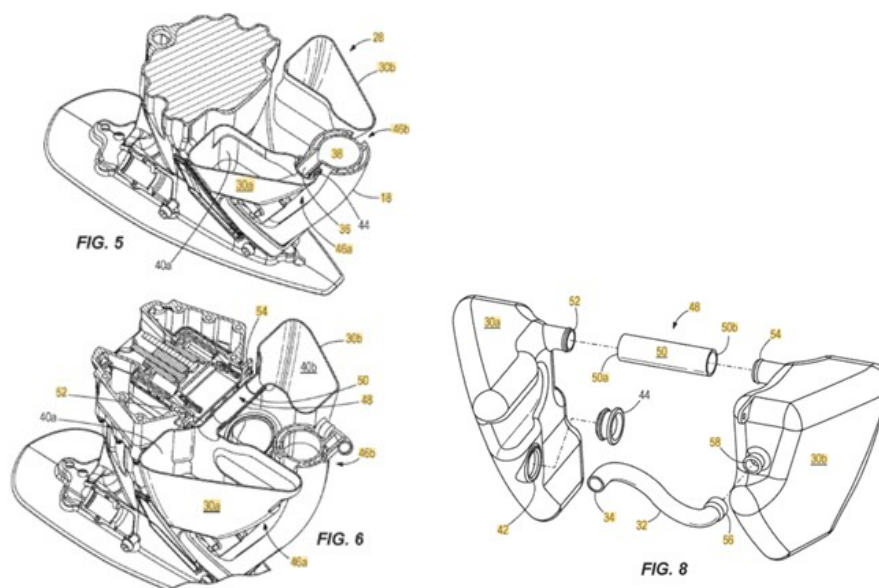
Konceptutveckling

4.1 Patentsökning och referenslösningar

För att identifiera befintliga lösningar och koncept genomfördes en patentsökning samt analys av relevanta referenssystem. Syftet var att kartlägga olika metoder för att reducera ljudnivå och mottryck i marina avgassystem. Nedan presenteras utvalda lösningar som ligger till grund för den fortsatta konceptutvecklingen.

4.1.1 Exhaust gas idle relief system

Patentet av Jaszweski et al. [6] beskriver ett tomgångsavgas-system för utombordsmotorer där avgaser vid låga varvtal leds ut genom en separat ljuddämpande kammare istället för att gå hela vägen ner till det nedsänkta huvudloppet. Systemet består av en avgaspipa som leder avgaser från motorn och mitt på denna finns ett särskild idle relief-utsläpp som avleder en del av avgaserna in i en extern ljuddämpande plenumkammare. Eftersom plenumkammaren är placerad utanför motorns mittsektion kan avgaserna expandera och dämpas effektivt innan de släpps ut i atmosfären. Detta minskar både ljudnivån och mottrycket vid tomgång, vilket ger en tystare och stabilare motorgång utan att påverka det ordinarie undervattensutsläppet vid högre varvtal. Figur 4.1 visar hur systemet är uppbyggt samt hur avgaserna leds genom de olika komponenterna.

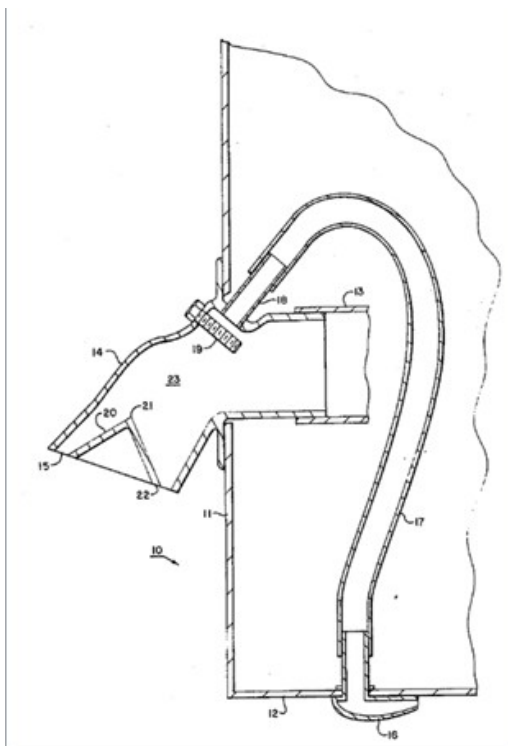


Figur 4.1: Exhaust gas idle relief system av Jaszweski et al. (2014)

4.1.2 Exhaust relief system

Detta patent av Freund et al. [7] beskriver ett tomgångsavgas-reliefsystem för utombordsmotorer. Dess syfte är att minska ljudnivån och förbättra motorns gång vid tomgång genom att låta delar av avgaserna släppas ut ovan vattenytan under vissa förhållanden. Mot bakgrund av att undervattensutsläpp vid tomgång skapar högt backtryck och dålig motorgång löser patentet detta med en smart och självreglerande struktur inne i drivhusets vattenfyllda kammare.

I motorns drivhus finns en delvis vattenfylld kammare, och ovanför vattennivån finns både en inloppskanal från huvudgassystemet och en utloppskanal till atmosfären. När avgasmängden är låg, som vid tomgång, tar gaserna den vägen eftersom mottrycket under vattnet är högre. Detta gör att motorn går jämnare samt att ljudet reduceras eftersom vattenkammaren och luftutrymmet tillsammans dämpar tryckpulserna innan de släpps ut i luften. Systemet fungerar helt passivt och förbättrar både tomgångsegenskaper och ljudnivå hos utombordaren. Figur 4.2 illustrerar systemets uppbyggnad och de huvudsakliga flödesvägarna för avgaserna genom drivhuset.

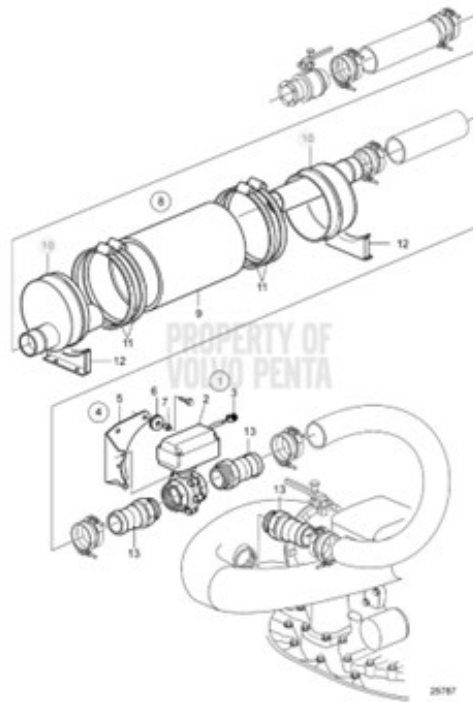


Figur 4.3: Water-injected exhaust system av Stuart (1978)

4.1.4 Clear wake exhaust system

Clear wake exhaust system (CWES) [9] är ett system som Volvo Penta själva har utvecklat till deras IPS motorer för att leda om avgaserna ovanför ytan under tomgång. Systemet bygger på att en elektrisk ventil öppnas och stängs beroende på om motorn körs med eller utan last, vilket gör att avgaserna väljer den väg med minst motstånd. När motorn körs på tomgång och ventilen är öppen, leds avgaserna ut från en separat öppning i bockhornet då den vägen har mindre motstånd än det vanliga utloppet. Från bockhornet går avgaserna genom en slang och förbi ventilen till en ljuddämpare som minskar oönskat ljud från avgaserna. Från ljuddämparen leds avgaserna vidare ut till utsidan av båten ovanför vattenytan.

När motorns varvtal överskrider en utsatt gräns, stängs ventilen och avgaserna tar istället det vanliga utloppet och släpps ut under ytan. Figur 4.4 visar tilläggssystemet, avgasernas olika flödesvägar och ljuddämpningen för den alternativa flödesvägen.



Figur 4.4: Clear wake exhaust system av Volvo Penta

4.2 Konzeptgenerering

Denna del av arbetet har genomförts i enlighet med principerna för Set-Based Engineering enligt Toyotas produktutvecklingsfilosofi [1]. Metoden valdes för att möjliggöra ett brett utforskande av alternativa lösningar för att minska risken för tidig designlåsning i ett skede med ofullständig kunskap.

Utifrån systemets övergripande mål och funktionskrav genomfördes en inledande idé- och konceptgenerering, där flera potentiella lösningar togs fram parallellt. I detta skede prioriterades bredd och variation framför detaljerade koncept, i syfte att etablera ett stort lösningsutrymme.

I linje med Set-Based Engineering vidareutvecklades flera koncept samtidig snarare än att ett enskilt koncept valdes tidigt. Varje koncept analyserades översiktligt med avseende på funktion, teknisk genomförbarhet och hur väl det uppfyllde identifierade krav och begränsningar. Allteftersom ny kunskap genererades genom analyser och jämförelser reducerades antal koncept genom att mindre lämpliga alternativ uteslöts.

Beslutsfattandet skedde således gradvis och kunskapsbaserat, där konceptval sköts upp tills att tillräcklig förståelse hade uppnåtts. Detta arbetssätt möjliggjorde en mer robust jämförelse mellan alternativ och skapade bättre förutsättningar för ett välgrundat slutgiltigt konceptval.

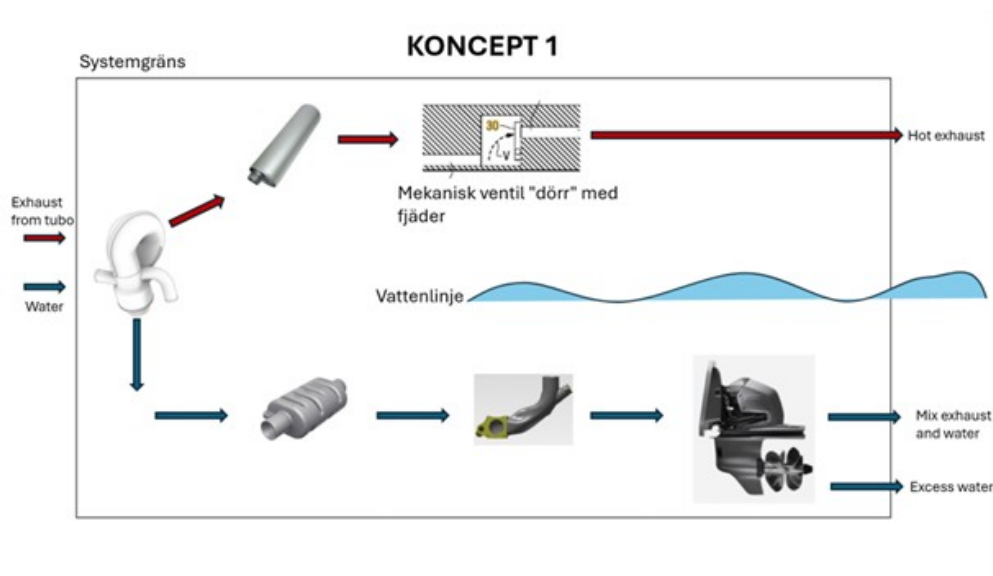
Nedan presenteras de koncept som följt med längst i processen och vidareutvecklats.

4.2.1 Koncept 1

Koncept 1 baseras på användningen av en fjäderbelastad mekanisk ventil, vars stängningsmekanism är tryckstyrd. Under normal drift leds avgaserna från risern mot vatteninloppet och följer därmed det ordinarie avgassystemets flödesväg. För att ytterligare reducera ljudnivån har dock en extra ljuddämpare integrerats innan utloppet.

Den mekaniska ventilen, som är placerad i avgassystemet som går från risern, är konstruerad för att förbli stängd vid högre motorvarvtal, då det rådande avgasmottrycket är förhöjt. Fjädersen är dimensionerad så att ventilen öppnas när trycket sjunker vid lägre varvtal. Denna funktion möjliggör ett så kallat idle-relief-system där avgasbubblorna elimineras då de varma avgaserna vid tomgång leds över vattenytan och bidrar till tystare tomgångskörning.

Vid vanlig drift säkerställer ventilen att alla avgaser leds ut genom ordinarie flödesväg utan extra läckage genom idle-relief-systemet.



Figur 4.5: Illustration av koncept 1

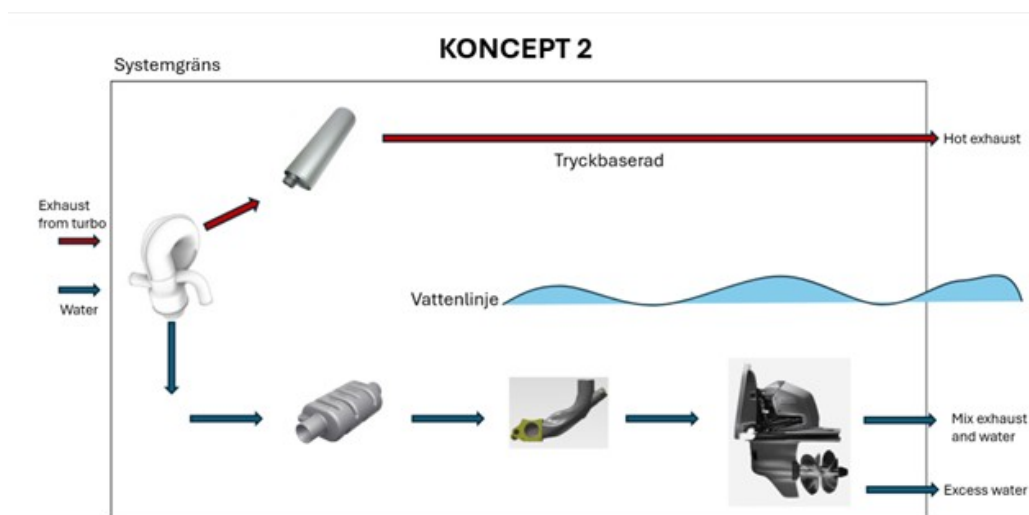
4.2.2 Koncept 2

Detta koncept uppvisar stora likheter med koncept 1, men är utformat enligt ett mer minimalistiskt angreppssätt. Systemet är utrustat med vatten- och temperaturanpassade ljuddämpare, vilka är placerade både i det ordinarie avgassystemets flödesväg och i idle-relief-systemet. Den huvudsakliga skillnaden jämfört med koncept 1 är att den mekaniska ventilen har eliminerats. Regleringen av flödesvägen sker istället genom dimensionering av tilläggssystemets rörgeometri, där rördimensionerna är beräknade för att styra avgaserna mot idle-relief-systemet vid tomgångsdrift,

med utgångspunkt i grundläggande tryckteoretiska principer.

Enligt den tidigare presenterade teorin (kapitel 2.2 Tryck) tenderar avgaser att följa den flödesväg som erbjuder lägst motstånd. Genom att dimensionera rören i idle-relief-systemet med en tillräckligt liten diameter kan det interna trycket hållas lägre än trycket från den vattenpelare som etableras i det ordinarie avgassystemet. Därmed leds avgaserna företrädesvis genom idle-relief-systemet, snarare än att övervinna vattenpelarens mottryck.

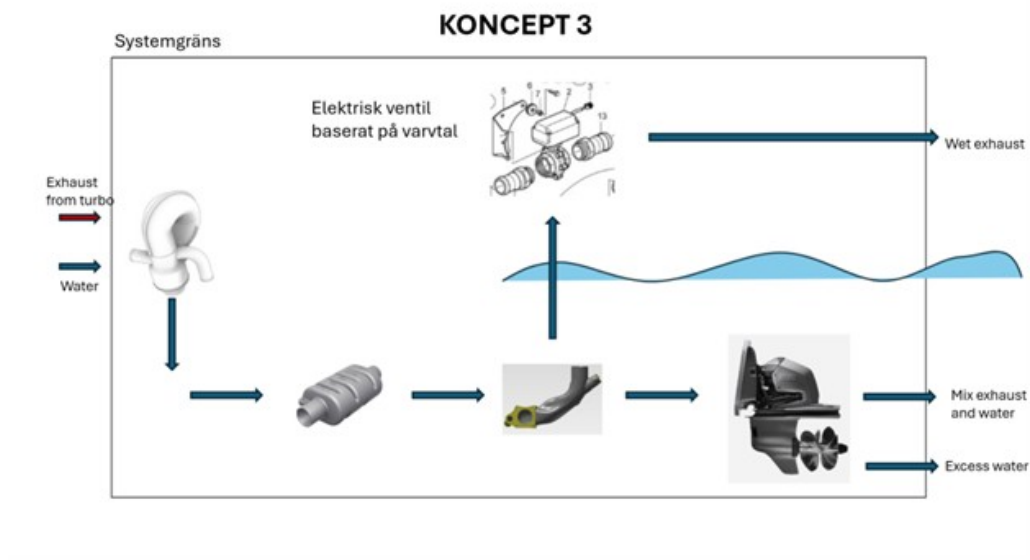
En potentiell utmaning med denna lösning är att funktionen är starkt beroende av noggrann dimensionering och stabila driftförhållanden, vilket kan innebära begränsningar vid varierade belastnings- och varvtalsförhållanden.



Figur 4.6: Illustration av koncept 2

4.2.3 Koncept 3

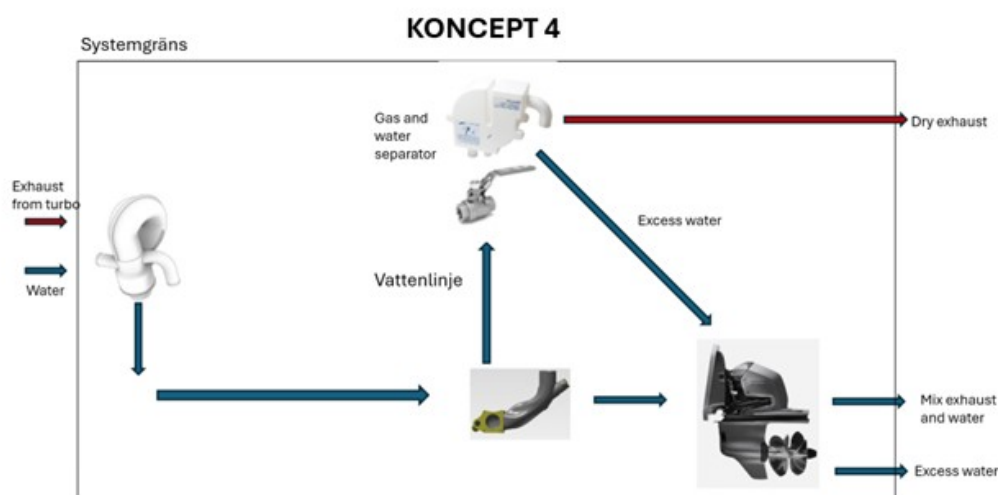
Koncept 3 tar stor inspiration av Volvo Pentas egna "Clear Wake Exhaust System" (CWES). Den fungerar, liknande koncept 1, att en ventil används för att säkerställa att avgaserna inte läcker ut i tilläggsystemet vid drift under högre varvtal. Skillnaden på detta system är den elektriskt kopplade ventilen som öppnas och stängs baserat på varvtal. Vid låga varvtal hålls ventilen öppen och möjliggör att avgaserna kan frigges genom CWES. Vid högre varvtal stängs ventilen och ser till så att alla avgaser färdas genom det ordinarie avgassystemet. Utöver detta tilläggs även en extra ljuddämpare.



Figur 4.7: Illustration av koncept 3

4.2.4 Koncept 4

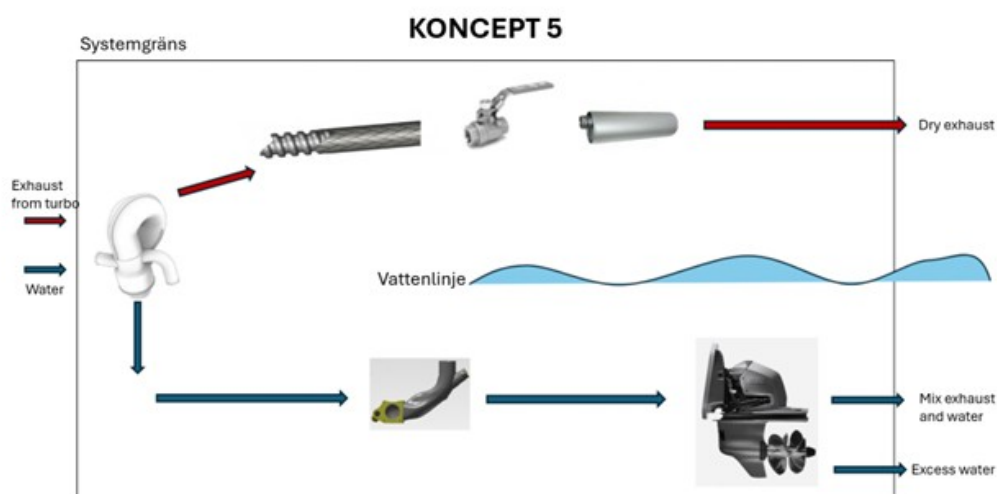
Detta koncept kombinerar i grunden olika egenskaper från tidigare koncepten. Det är ett idle-relief-system som regleras genom en ventil som, jämfört med tidigare, är helt manuellt styrd. På grund av de interna trycken som uppstår i systemet så ska avgaserna enligt teorin flöda genom lättast möjliga passage vilket betyder att en ventil som stängs inte är nödvändig. Istället regleras ventilen endast en gång vid installation för att minska ingångsdiametern på idle-relief-röret så att dess interna tryck anpassas till trycket som uppstår av vattenpelaren för den installationen. Detta är nödvändigt då alla båtinstallationer ser annorlunda ut och drabbas av olika tryck. I tilläggsystemet finns en gasseparator som separerar vattnet från avgaserna. Detta möjliggör att de kylda avgaserna frigges över vattenytan medan överskottet av vattnet leds tillbaka under vattenytan.



Figur 4.8: Illustration av koncept 4

4.2.5 Koncept 5

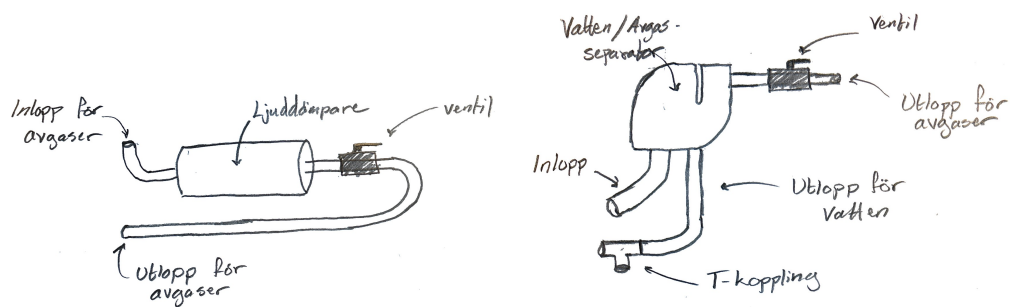
Detta koncept är också en kombination av tidigare koncept. Funktionen och regleringen av gasflödet sker, som i tidigare idle-relief-system, på grund av tryckskillnaderna i systemet. Ventilen är, som i Koncept 4, en manuell ventil som man reglerar en gång vid installation av båten. Komponenter för detta koncept behöver vara temperaturtåliga då avledning av avgaserna sker innan det kyls med vatten.



Figur 4.9: Illustration av koncept 5

4.3 Utvärdering av genererade koncept

Efter ytterligare eliminering av de svagaste koncepten kvarstod två koncept med stor potential för vidareutveckling, koncept 4 och koncept 5. Dessa koncept ligger väl inom ramarna för de uppsatta kraven en slutgiltig lösning ska uppfylla. De kvarstående koncepten är relativt lika, med den största skillnaden att det ena systemet avskiljer torra avgaser medan det andra avskiljer blöta avgaser. Båda dessa koncept har även en ökad kavititet på bockhornet för att eliminera vissa frekvenser. Nedan syns skisser av de grundläggande delarna av dessa koncept.



Figur 4.10: Skiss av potentiella prototyper för koncept 4 och koncept 5

5

Detaljkonstruktion

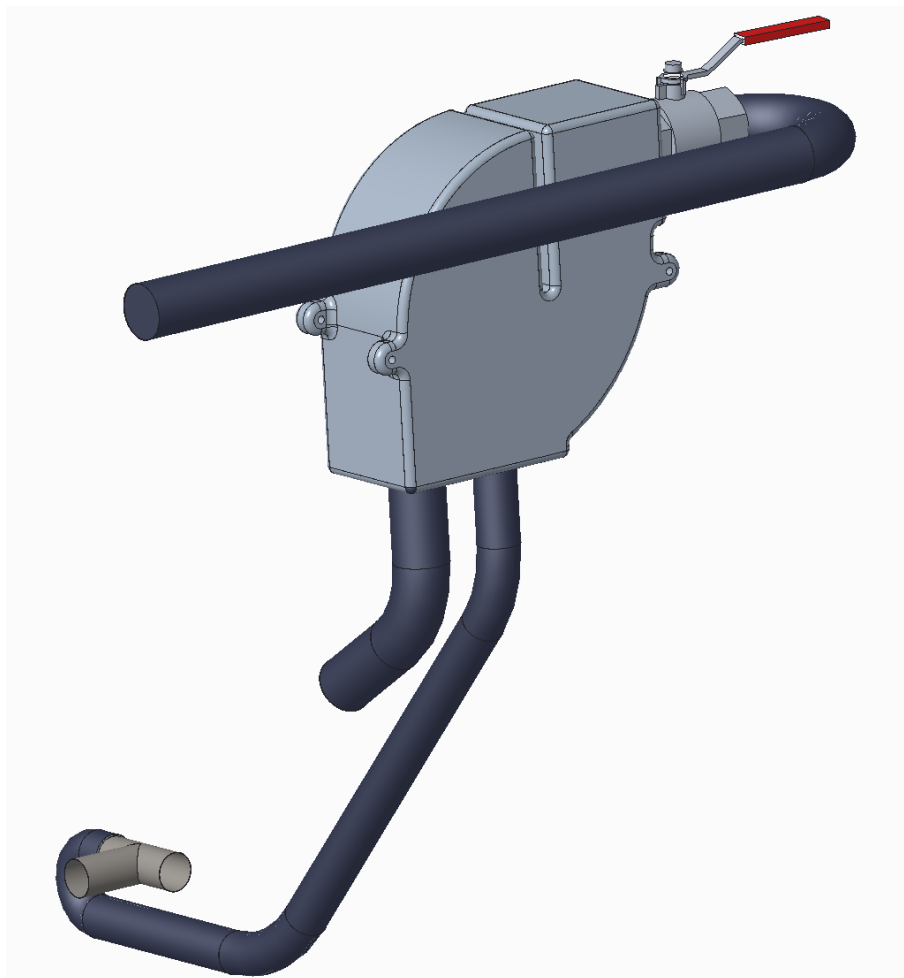
I denna del beskrivs tillvägagångssättet efter idégenereringen. Vidareutveckling av de två kvarstående koncepten genom modelleringar och beräkningar leder till prototyper som anses vara värda för företagen att göra verkliga tester på. Denna del iakttar även till vilken mån koncepten uppfyller de utsatta kriterierna för projektet.

5.1 Detaljerad design

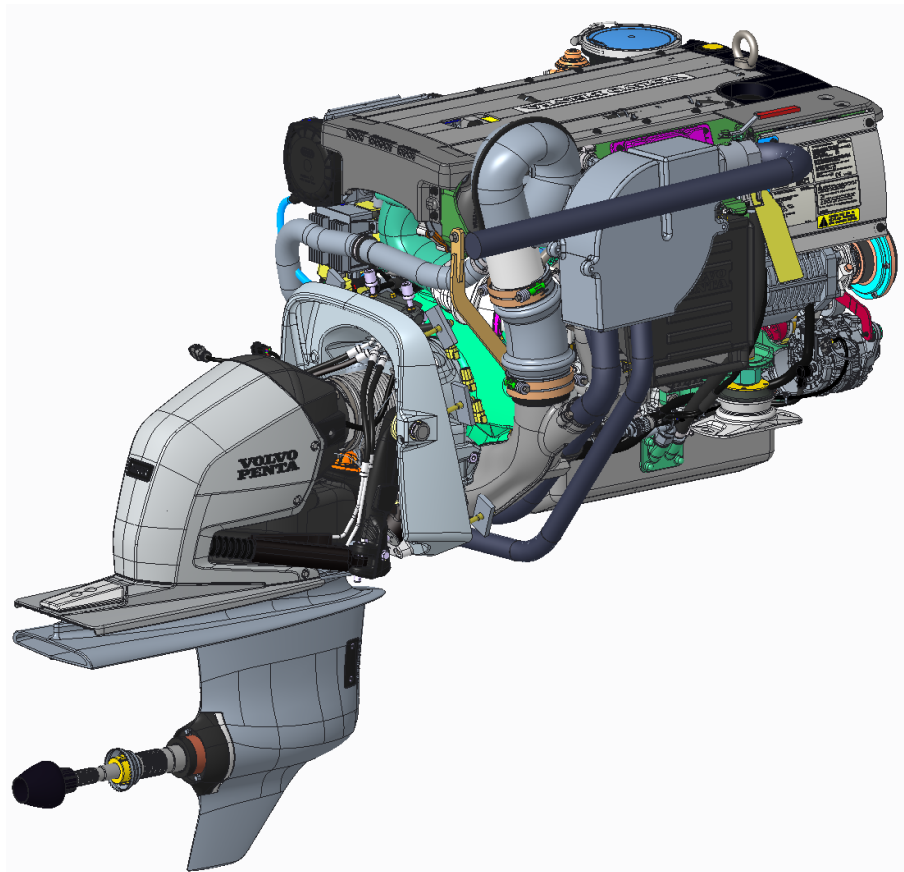
För de kvarstående koncepten utvecklas här mer detaljerade designar. För att säkerställa att lösningarna uppfyller KR-FUN-003 (kompatibilitet med nuvarande design) modelleras visuella prototyper i Creo Parametrics. Dessa jämförs med tidigare dimensionsmätningar som gjorts på Krossholmen i verkliga installationer av Volvo Pentas dieselmotorer.

I detta stadie görs även mer detaljerade beräkningar för mottryck, dimensioner och ljudreducering utifrån tidigare teknisk data A.1. Då projektets mål är att framföra förslag på potentiella prototyper för vidare testning, är målet med beräkningarna att få en godtycklig förståelse för hur väl koncepten hade fungerat i verkligheten. Det vill säga att simuleringar och mer avancerade beräkningar inte görs, utan är något som företagets egna resurser får göra om det anses vara nödvändigt.

I figurerna nedan syns designen för båda koncepten, samt en mer detaljerad beskrivning av systemen i helhet. Figurerna visar både koncepten självständigt och tillsammans med den tänka utplaceringen på resterande system.

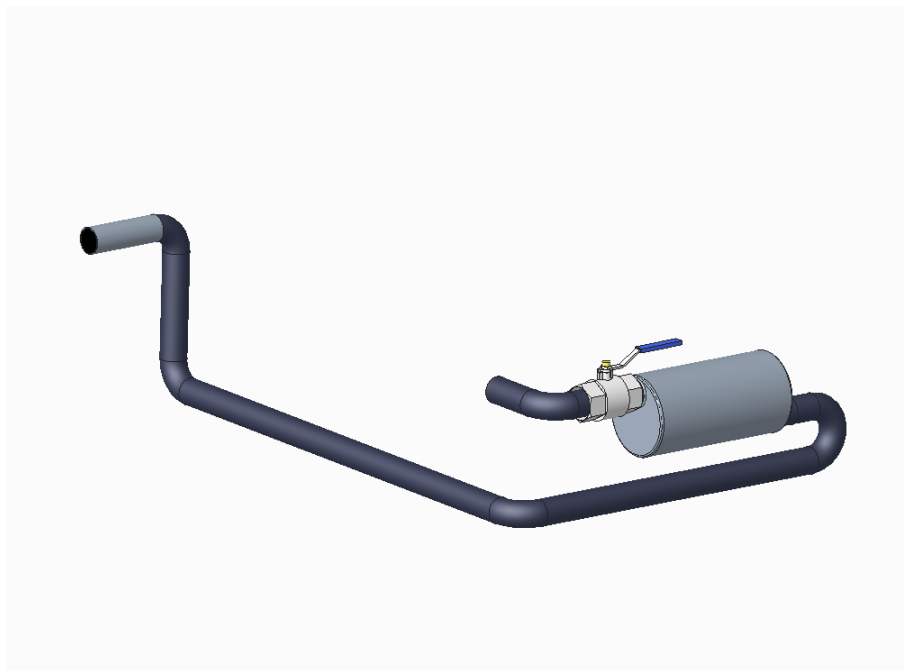


Figur 5.1: CAD-modell av koncept 4

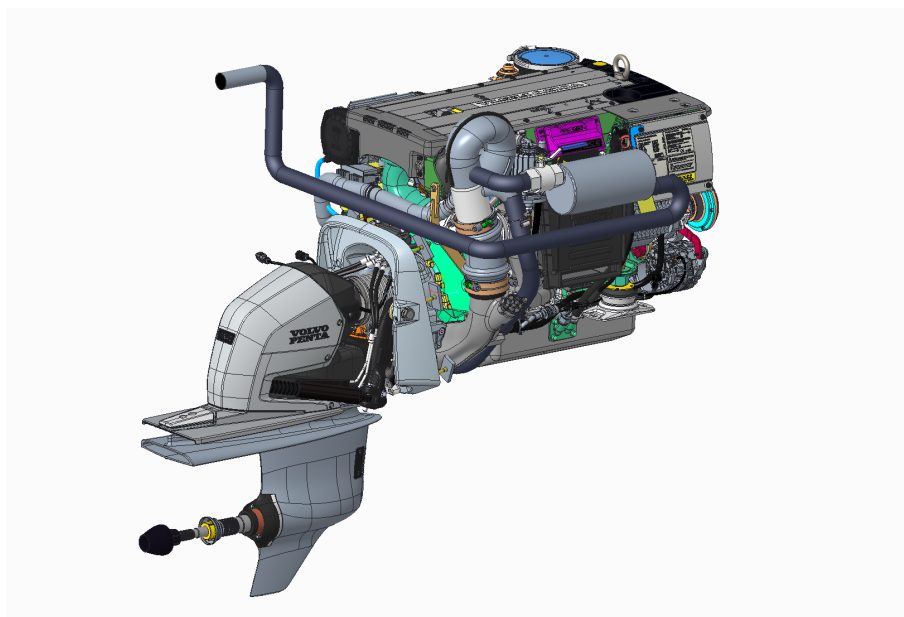


Figur 5.2: CAD-modell av koncept 4 utplacerad med motor

Koncept 4 fungerar genom att en modifikation på det nuvarande bockhornet som tillåter en separat väg för avgaserna och en del av vattnet. Avgaserna rör sig till området med lägst tryck, det vill säga det nytilagda utloppet, medan majoriteten av vattnet lägger sig i vattenpelaren. Från den nya vägen leds dessa genom en slang till en avgas- och vattenseparator. I separatorn delas avgaserna och vattnet upp och leds genom två olika vägar. Detta möjliggörs på grund av dess olika densiteter och de tryckskillnader som finns i systemet. Här agerar även separatorn som en kammardämpare för avgaserna då volymskillnaden från inloppet och separatorn skiljer sig avsevärt. Avgaserna går genom en slang till ett utlopp som befinner sig ovanför vattenlinjen. Vattnet rinner genom en slang ned till en T-koppling som sammansluter till systemets ordinarie vattenutlopp. En ventil är även fäst på slangen mellan bockhornet och separatorn som ett verifieringsverktyg för att möjliggöra reglering av systemets dimension, vilket i sin tur påverkar det interna trycket.



Figur 5.3: CAD-modell av koncept 5



Figur 5.4: CAD-modell av koncept 5 utplacerad med motor

Detta koncept innehåller väldigt få och enkla komponenter. En slang går från risern till en ventil med syfte att reglera systemets dimensioner och det interna trycket. Avgaserna leds in i en ljuddämpare och vidare till utloppet över vattenytan. Systemet består av torra avgaser då avgasuppdelningen sker innan vattenblandaren.

5.2 Kriterieuppfyllelse

Då fysiska prototyper ej tillverkas och testas inom arbetets tidsram kan flera kriterier inte med säkerhet uppfyllas. De kriterier som bedöms uppfyllas är de som inte kräver fysisk testning. För båda koncepten gäller detta kompatibilitet med befintlig design, enkel installation, säkerhetsfunktion vid systemfel, materialkrav samt gränssnitt. Kriterier som däremot inte kan säkerställas utan praktiska tester inkluderar ljudreducering, minskad bubbelbildning, att inga nya oönskade ljud eller fenomen uppstår. Kostnadseffektiv produktion är delvist säkerställd då en inköpslista har framställts utan hänsyn till installationskostnader och fortsättningsarbete.

Kravet för tålighet mot havsvatten uppfylls av koncept 5 då tilläggen till systemet tillkommer innan havsvatten bladas in, vilket inte påverkar systemets nuvarande skydd mot korrosion. Detta krav uppfylls även av koncept 4 om rätt val av material tas, trots ändringar till delar av systemet som innehåller vatten. Valet av material blir ännu mer viktig vid vidareutveckling av en fulländad produkt då den marina miljön kräver höga krav mot korrosion. Detta är något som företaget själva får undersöka med sina resurser om vidareutveckling sker.

Efter framläggning och diskussion av de två kvarstående koncepten med handledare, har beslutet tagits att koncept 4 är det koncept som visar mest potential och det som företaget beslutat att arbeta vidare med i nuläget.

5.3 Prototyp

Som tidigare nämnt är detta examensarbete en del av ett större NVH-projekt inom företaget. Tillverkande och testande av prototyperna för de två förslag som lagts fram är planerad att äga rum efter examensarbetets slut. Detta betyder att tillverkning av någon verklig prototyp ej kommer äga rum. Förslag på komponenter som krävs för prototyp-tillverkning av de två kvarstående koncepten läggs fram här. Detta för att företaget ska kunna vidareutveckla och testa koncepten.

Nedan listas komponenter för en funktionell prototyp av koncept 4. På grund av säkerhetsskäl listas endast komponenternas antal och inte dess dimensioner. Vissa artiklar har ändrats från detaljkonstruktionen på grund av olika orsaker. Exempelvis har T-kopplingen blivit utbytt mot en Y-koppling för lättare installation. Valet av en transparent slang mellan separatoren och vattenutloppen ger möjligheten att se var vattennivån ligger under prototyp-testen.

Artikel	Antal
För återställning av installation:	
Bockhorn	1
O-ring	1
O-ring	1
Anod KIT	1
Slang (nuvarande)	1
För prototyp-test:	
Separator	1
Avgasslang	4 m
Rostfri Y-rör	1 st
Transparent slang	2 m
Kulventil	1
Slangnippel, kulventil	2
Avgasslang	3
Slangklämmor	20

Tabell 5.1: Komponentlista för koncept 4

6

Diskussion

Koncept 4, vilket är det koncept som bedöms ha störst potential, uppvisar en betydande fördel i att avgaserna redan är kylda när de leds in i idle-relief-systemet. Detta eliminerar behovet av att integrera ytterligare delsystem för kylning. Vidare medför denna egenskap att ingen avancerad ventilmekanism behövs implementeras eftersom flödesvägen kan hållas öppen under drift, även vid förhöjda avgastemperaturer. Ytterligare en fördel är att konceptet bygger på användning av en etablerad komponent i form av en avgas- och vattenseparator, vilken har visats fungera effektivt i andra modeller och tillämpningar. Den ventil som används för att reglera det interna trycket är dessutom robust utformad och bedöms ha hög hållbarhet, vilket bidrar positivt till systemets driftsäkerhet och livslängd.

Eftersom avgaser leds via idle-relief-utgången vidare till separatorn kan det uppstå utmaningar kopplade till att upprätthålla ett stabilt tryckförhållande i systemet. Felaktig tryckreglering kan leda till försämrad motorgång eller oönskade flödesfördelningar mellan avgasvägar. Den tryckreglerande ventilen förväntas teoretiskt kunna hantera dessa variationer och bidra till en stabil drift. Dock har denna funktion ännu inte verifierats genom praktisk provning, vilket innebär att dess prestanda och tillförlitlighet under verkliga driftförhållanden i nuläget är ostuderat.

Avgaser innehåller sot, partiklar och kondensat som kan samlas i separatorn eller kanalerna. Detta kan på sikt leda till igensättning, vilket påverkar funktionalitet och kräver underhåll. Utöver detta utsätts systemet för en stor mängd havsvatten samt betydande temperaturvariationer vilket medför en ökad risk för korrosion och materialdegradering. Denna typ av miljö som består av både hög fuktnivå och aggressiva kemiska förhållanden ställer höga krav på val av material och ytbehandlingsmetoder.

För att motverka korrosionsangrepp kan implementering av offeranoder vara en relevant åtgärd då dessa kan reducera galvanisk korrosion för de bärande komponenterna. Samtidigt måste materialvalet för systemets ingående delar optimeras med avseende på korrosionsbeständighet, termisk tålighet och mekanisk hållfasthet på de delar som är möjliga att anpassa så som slangar, kopplingar eller ventil.

Implementering av konceptet i befintliga motorplattformar kan kräva anpassningar av layout, utrymme och gränssnitt mot andra system vilket kan påverka både kostnad och komplexitet. Framförallt kan separatorn, beroende på installation, ta upp mycket plats i motorrummet. En ytterligare viktig aspekt att iaktta vid installation av separatorn är dess orientering. Det är av vikt att den monteras med en lämplig

lutning så att ansamling av vatten i lokala lågpunkter undviks. Otillräcklig dränering kan annars leda till försämrad funktion, ökat mottryck eller risk för driftstörningar.

Utöver kravet på korrekt orientering av separatoren kan det vara fördelaktigt att montera den på en justerbar plattform som möjliggör fininställning av dess höjdpå position. Det är särskilt viktigt att separatoren placeras i rätt höjd i förhållande till vattenlinjen för att minimera risken för mottryck eller översvämning. Samtidigt bör det analyseras huruvida höjdpå placeringen påverkar motorns prestanda, då avgaserna och en del av vattnet i detta fall måste transporteras mot gravitationen för att nå separatoren. Detta kan potentiellt innebära ökade tryckförluster, vilket bör beaktas vid dimensionering och systemoptimering.

Koncept 5 betraktas som en enkel konstruktion lämpad för prototyp tillverkning. Med ett mycket begränsat antal komponenter möjliggör det en utvärdering av idrelief-teorins kompatibilitet med Volvo Pentas nuvarande systemet. I nuläget ses konceptet dock inte som en fullständig lösning, utan snarare som en grund som kan kräva ytterligare justeringar.

Systemet saknar aktiv kylning och baseras helt på torra avgaser som leds via tilläggs-systemet från risern till det nya utloppet. I teorin utgör detta det mest grundläggande konceptet för att uppfylla huvudkravet – att reducera buller från bubbelbildning vid tomgång. Det är dock svårt att verifiera funktionen utan praktiska tester. Om teorin stämmer, det vill säga att avgaserna vid tomgång tar den lättaste vägen genom tilläggs-systemet, medan de vid drift uteslutande leds genom huvudsystemet utan läckage, kan detta vara en mycket effektiv lösning. Om läckage däremot uppstår under drift blir situationen problematisk då avgastemperaturen i detta läge kan vara flera hundra grader högre än vid tomgång.

Att temperaturanpassa systemet är möjligt, exempelvis genom användning av metallrör eller specialförstärkta slangar. Dessa slangar är dock relativt kostsamma, även om de ger flexibilitet vid installation i motorrummet. Samtidigt medför utsläpp av mycket varma avgaser i närheten av båtbyggnaden en ökad risk för olyckor och brännskador, vilket måste beaktas.

En fördel med detta koncept är dess enkelhet vilket möjliggör smidig experimentering med olika längder, geometrier och dimensioner utan att hantera komplexa komponenter. Den manuella ventilen, som även används i koncept 4, ger möjlighet att praktiskt utvärdera teorin kring tryckreglering och avgöra om den har en märkbar effekt i verkliga driftförhållanden. Dessutom underlättar konceptet tester med olika slangdimensioner, vilket gör det möjligt att optimera systemet utifrån prestanda och funktion.

Om läckage upptäcks vid provkörning kan konceptet vidareutvecklas genom att integrera en elektrisk ventil vid inloppet, i likhet med CWES-lösningen. Ventilen kan kopplas till en varvtalssensor och därmed öppnas eller stängas beroende på motorns driftläge, vilket möjliggör separation mellan tomgång och högre belastning.

En felkälla för projekts resultat är att det inte har gjorts några mer avancerade beräkningar eller flödesanalyser för systemets funktion. Det betyder att de framtagna koncepten inte med säkerhet kommer att fungera innan fysiska tester har gjorts.

7

Slutsats och Framtida rekommendationer

I detta kapitel presenteras slutsatser som framtagits kring huvudkonceptet, teorier, teknisk och utrymmesbetingad komplexitet samt de material- och miljömässiga utmaningar som uppstått. Förslag för vidareutveckling av koncept kring dessa punkter presenteras även här.

7.1 Slutsats

Syftet med detta examensarbete var att ta fram ett alternativt sätt att leda ut avgaserna från Volvo Pentas dieselmotorer både under tomgång och vanlig drift med målet att reducera önskat ljud för att öka användarupplevelsen. Genom att tillämpa produktutvecklingsmetodiken Set-Based Engineering har ett brett lösningsutrymme utvärderats parallellt vilket resulterat i två olika idle-relief-koncept baserade på antingen blöta eller torra avgaser.

Koncept 4, som baseras på ett blött avgassystem med en integrerad avgas- och vattenseparator, bedöms ha störst potential att uppfylla projektets huvudkrav på ljud- och bubbelreducering. Att avgaserna redan är kyllda när de leds in i idle-relief-systemet eliminerar behovet av komplexa kylsystem och avancerade ventilmekanismer, vilket ökar systemets driftsäkerhet.

Med beräkningar angående mottryck samt överdimensionering anses koncept 4 med stor sannolikhet uppfylla projektets syfte. Detta kan inte bekräftas innan fysiska tester med en verklig prototyp genomförts. Koncept 5 erbjuder en enklare konstruktion som med minimalt antal komponenter utgör en utmärkt bas för att i ett tidigt skede verifiera idle-relief-teorins kompatibilitet med motorplattformen. Detta koncept kräver mer undersökning angående kylning av avgaserna alternativt tillsättning av en elektrisk ventil.

Implementering av en avgas- och vattenseparator medför utmaningar rörande utrymme och layout i motorrummet. Korrekt fysisk orientering och dränering är kritiska parametrar för att undvika vattenansamling, ökat mottryck och driftstörningar.

Den aggressiva marina miljön med höga avgastemperaturer, saltvatten och kondensat ställer extremt höga krav på materialval. För att motverka korrosion och

igensättning av sot över tid krävs optimerade materialytor samt eventuell implementering av offeranoder.

7.2 Vidareutveckling av koncept

Här presenteras nästa steg i utvecklingen mer noggrant. De olika egenskaperna, materialoptimering samt installationsanpassningar och felkällor diskuteras.

7.2.1 Experimentell tryckreglering och ventilloptimering

För att ta de utvecklade koncepten från teoretiska CAD-modeller till funktionella system krävs en omfattande verifierings- och optimeringsfas. Det primära steget i den fortsatta utvecklingen är att genomföra noggranna mätningar av ljudnivå (dB), avgastemperatur och interna tryckförhållanden under kontrollerade former. Detta är kritiskt för att kunna göra en kvantitativ jämförelse mellan de olika driftfallen och säkerställa att huvudkravet på ljud- och bubbelreducering uppfylls, utan att motorns prestanda komprometteras. Under denna fas måste de teoretiska riskerna, så som igensättning av systemet till följd av sot- och partikelansamling samt mekaniska påfrestningar och vibrationer, som kan leda till materialutmattning eller läckage över tid, undersökas och motverkas.

Eftersom båda koncepten i grunden bygger på tryckteoretiska principer och flödesfördelning enligt minsta motståndets lag, är en exakt kalibrering av det interna trycket avgörande. För Koncept 4 måste balansen mellan separatorns höjdsposition och den hydrostatiska vattenpelaren verifieras experimentellt eller genom mer avancerade flödesanalyser. Då funktionen hos den manuella ventilen ännu inte testats i verkliga driftförhållanden, bör framtida provning utvärdera hur känsligt systemet är för variationer i motorvarvtal och belastning.

För Koncept 5 är risken för gasläckage vid högre varvtal en kritisk felkälla som kan leda till extremt höga temperaturer i idle-relief-systemet. Om praktiska tester visar att tryckbalansen inte är tillräcklig för att hålla systemet tätt under drift, bör en vidareutveckling ske där en elektrisk ventil integreras vid inloppet. Denna ventil kan, i likhet med Volvo Pentas befintliga CWES-system, styras aktivt via en varvtalssensor för att garantera en absolut separation mellan tomgångskörning och normal drift.

7.2.2 Materialoptimering och korrosionsskydd

Det framtida arbetet måste lägga stort fokus på materialval och hållbarhet, då kombinationen av aggressivt havsvatten, sot och höga avgastemperaturer skapar en extremt korrosiv miljö. Särskilt för Koncept 4, där modifieringar görs i det befintliga vattensystemet, krävs en djupare analys av galvanisk korrosion.

En rekommendation är att studera om en integration av dedikerade offeranoder i anslutning till de nya komponenterna krävs för att skydda de bärande strukturer-

na. Materialvalen för slangar och ventiler måste optimeras och genomgå långvariga livslängdssimuleringar och temperaturcyklningar för att säkerställa att de klarar de temperaturer, slitage samt mekaniska vibrationer från drivlinan.

7.2.3 Installationsanpassning och geometrisk utformning

Slutligen kräver systemets fysiska layout en anpassning efter det begränsade utrymmet i de moderna motorrummen. Eftersom avgas- och vattenseparatorn i Koncept 4 är utrymmeskrävande, bör framtida studier undersöka möjligheten att minska komponentens geometri utan att förlora flödeskapacitet. Efter fysiska tester av prototypen kan även gränssnittet för slangar och andra komponenter optimeras beroende på resultatet.

Dessutom måste separatorns orientering och monteringsvinkel standardiseras. En felaktig lutning kan skapa lokala lågpunkter där vatten ansamlas, vilket i värsta fall leder till ökat mottryck och motorstörningar. Att utveckla en justerbar monteringsplattform som tillåter finjustering av höjddpositionen ovanför vattenlinjen vid installation i olika båtmodeller är därför ett prioriterat område för nästa utvecklingsfas.

7.3 Slutord

Sammanfattningsvis visar arbetet att ett passivt eller tryckreglerat idle-relief-system är en teknisk genomförbar lösning för att leda bort avgaserna ovanför vattenytan vid tomgång. Detta behandlar den dominerande ljudkällan från bubbelbildningen utan att kompromissa med motorns ordinarie prestanda under drift. Då projektets tidsram begränsats till våren 2026 kvarstår den praktiska verifieringen vars ansvar överlämnas till Volvo Penta. De framtagna CAD-modellerna och strömningsberäkningarna från detta projekt utgör ett stabilt och robust tekniskt underlag för Volvo Pentas planerade fysiska prototyptester som planerats ske under andra halvåret av 2026. Om testernas resultat visar en stor förbättring till reduceringen av ljud är nästa steg för Volvo Penta att vidareutveckla konceptet för att till slut integrera det i den nuvarande produkten.

Litteraturförteckning

- [1] D. K. Sobek II, A. C. Ward, and J. K. Liker, “Toyota’s principles of set-based concurrent engineering,” *Sloan Management Review*, vol. 40, no. 2, pp. 67–83, Winter 1999. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/248139929_Toyota's_Principles_of_Set-Based_Concurrent_Engineering
- [2] Trust My Mechanic, “Understanding the function of mufflers: How silencers work,” [Online]. Available: <https://www.trustmymechanic.com/understanding-the-function-of-mufflers-how-silencers-work/> [Accessed: May 27, 2026].
- [3] Y. F. Görgülü, S. Ekici, and T. H. Karakoç, “Comparative multiphase flow analysis of dry and wet marine exhaust systems based on thermal, pressure, and turbulence characteristics,” *IMSAR International Maritime Studies and Research*, vol. 1, no. 1, 2025. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17036438>
- [4] VagLinks, “Muffler design concept – Section 3,” [Online]. Available: https://www.vaglinks.com/Docs/Misc/MufflerDesignConcept_Section3.pdf [Accessed: May 27, 2026].
- [5] B. R. Munson, D. F. Young, and T. H. Okiishi, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, 5th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2006.
- [6] W. M. Jaszewski, C. H. Eichinger, and B. C. Frost, “Exhaust gas idle relief system for an outboard motor,” U.S. Patent 9,376,195 B1, Jun. 28, 2016. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US9376195B1/en>
- [7] M. A. Freund, P. H. Jennerjahn, and D. W. Kusche, “Idle exhaust relief system for outboard motors,” U.S. Patent 4,681,999 A, Jul. 21, 1987. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US4681999A/en>
- [8] R. B. Stuart, “Marine exhaust silencer,” U.S. Patent 4,100,994 A, Jul. 18, 1978. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US4100994A/en>
- [9] Volvo Penta, “Part sections – exhaust system,” [Online]. Available: <https://www.volvopenta.com/shop/0/part-sections/0000001522> [Accessed: May 27, 2026].
- [10] S. M. Ashrafur Rahman, H. H. Masjuki, M. A. Kalam, A. Sanjid, and M. J. Abedin, “Assessment of emission and performance of compression ignition engine with varying injection timing,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.049>

A

Appendix 1

Tabell A.1: Motorparametrar vid olika driftpunkter

Engine Speed [rpm]	Engine Torque [Nm]	Exhaust Flow [kg/s]	Exhaust Temp [°C]	Water Flow [l/min]
3701.0	609.1	0.371	415.0	155.9
3700.4	609.0	0.370	415.2	156.3
3367.0	502.0	0.295	372.9	148.3
2960.2	381.0	0.201	363.1	134.0
2331.0	241.8	0.110	343.8	111.7
700.0	0.1	0.021	88.4	81.1
699.8	-0.1	0.021	85.7	80.4

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige
www.chalmers.se



CHALMERS