

Empirisk motstandsberregning på fiskefartøy

Prosjektoppgave som undersøker metodene:

«Artificial Neural Network»

Digernes formel

Holtrop

Hollenbach

Oortmerssen

KRISTOFFER KLEPPESTØ

Veileder:

Prof. Sverre Steen



NTNU – Trondheim
Norwegian University of
Science and Technology

TMR4520
19.12.2014

Forord

Fiskefartøy skiller seg fra mange andre fartøystyper ved at de ofte har en bredere og fyldigere skrogfasong. Det er derfor vanskelig å finne empiriske metoder som klarer å prediktere motstanden med god presisjon. Det har vært en motivasjon for meg å kunne kvantifisere hvilke metoder som er egnet for fiskefartøy, og hvor stor forskjellen mellom ulike metodene er.

Oppgaven var i utgangspunktet ment som en prosjektoppgave som skulle fortsette som en masteroppgave neste semester. Grunnet god hjelp med fra fagpersoner knyttet til NTNU, MARINTEK og den norske maritime klyngen har arbeidet gått raskere enn forventet, slik at jeg kunne konkludere arbeide til jul. Arbeidet har derfor gått raskt, men jeg er trygg på at dette ikke har gått på bekostning av kvalitet og resultater.

Denne oppgaven hadde ikke vært mulig uten god hjelp og veiledning fra professor Sverre Steen, som har hjulpet meg med å strukturere og tilpasse arbeidet og til slutt denne rapporten. Jeg har også fått god hjelp fra Egil Jullumstrø og Dariusz Fathi som vært til uvurderlig hjelp for å skaffe tilgang til MARINTEKs modelldata og rapporter som er grunnstenen i dette arbeidet. En siste takk rettes til Einar Vegsund som har inspirert meg til å starte på dette arbeidet. Det er også flere andre som har vært til stor hjelp i ulike deler av rapporten.

Målet med denne rapporten er å bidra til oppfriskning av kunnskap, og bedre bruken av empiriske metoder i industrien.

Kristoffer Kleppesø



Trondheim, 19. desember 2014

Sammendrag

5 empiriske metoder er benyttet for å beregne totalmotstanden på 48 lastekondisjoner for 30 fiskefartøy i stille vann. Disse resultatene er sammenlignet mot modellforsøk og prosentvis avvik og standardavvik for alle modelltestede hastigheter er beregnet. Hastighetsområdet er delt opp i tre intervaller ($F_N \leq 0.2$, $0.2 < F_N \leq 0.3$ og $0.3 < F_N$), avviket og standardavviket innenfor disse intervallene er også beregnet.

Metodene som er behandlet er en ANN metode laget av MARINTEK for fiskefartøy, Digernes formel, Hollenbach, Holtrops og Oortmerssens metoder for estimering av motstand. ANN, Hollenbach og Holtrop er beregnet gjennom programmet ShipX, mens Digernes og Oortmerssen er beregnet med selvskrevet Matlab-skript. Alle dataene er behandlet og presentert gjennom Matlab. Tabellen viser resultatene for hele materialet og alle hastigheter som er modelltestet.

| | Middelavvik | Standardavvik |
|-------------|-------------|---------------|
| ANN | 2.3011 | 13.1306 |
| Digernes | 13.0064 | 14.3315 |
| Hollenbach | -13.6922 | 16.4739 |
| Holtrop | 4.8853 | 15.6854 |
| Oortmerssen | 34.1260 | 30.3128 |

Jeg har også forsøkt å se etter trender i avvikene over ulike parametere for å se om noen metoder er bedre på enkelt områder enn andre. Det var ingen tydelige trender for noen av metodene. Jeg undersøkte også de tre ulike modusene til Hollenbach, der det viste seg at metoden bør benyttes med «gode linjer» for fiskefartøy.

ANN og Holtrop er de metodene som kommer best ut og de er stabilt gode gjennom hele hastighetsområdet. Det skal nevnes at ShipX ikke tillater beregninger utenfor gyldighetsområdet, så ikke alle fartøy kunne beregnes. Digernes er en god metode som kan brukes på alle fartøy. Hollenbach er ikke å anbefale på fiskefartøy. Oortmerssens metode gir til tider merkelige resultater, så det er en mistanke om en feil i Matlab-skriptet. Slik Oortmerssen presenteres i denne rapporten kan metoden heller ikke anbefales.

Innhold

| | | |
|----------|--|-------------|
| 1 | Introduksjon | 1 |
| 2 | Andre metoder for motstandprediksjon | 2 |
| 2.1 | Modelltesting | 2 |
| 2.2 | CFD metoder | 4 |
| 3 | Empiriske metoder | 6 |
| 3.1 | Artificial Neural Network metode for fiskefartøy | 6 |
| 3.2 | Digernes formel | 8 |
| 3.3 | Hollenbachs predisjon av motstand | 10 |
| 3.4 | Holtrops statistiske metode for motstand | 13 |
| 3.5 | Oortmerssen formel for slepemotstand | 16 |
| 4 | Datamateriale | 19 |
| 4.1 | Moderne Skrogformer for Fiskefartøy | 19 |
| 4.2 | Konfidensielle fartøy | 19 |
| 5 | Resultater | 21 |
| 5.1 | Avvik for totalmotstanden | 21 |
| 5.2 | Trender | 24 |
| 6 | Konklusjon | 30 |
| 7 | Videre arbeid | 31 |
| A | ANN Grunnlag | I |
| B | Digernes.m | III |
| C | Oortmerssen_71.m | V |
| D | Avvikstrender | VIII |
| E | Middelavvik og Standard avvik for alle fartøy | XIV |

| | | |
|----------|----------------------|--------------|
| F | Motstandsplot | XXIII |
| G | Datagrunnlag | LXXII |

Figurer

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Et eksempel på anvendelse av CFD for å se strømningsbilde over en bulb (kilde: Croonenborghs et al. (2012)) | 5 |
| 3.1 | Oversikt over hvordan datamaterialet plasserer seg mot gyldighetsområdet til MARINTEKs ANN-metode. Gyldighetsområde er vist med fiolett ramme basert på to parametere. Hvert punkt representerer en lastekondisjon. | 7 |
| 3.2 | Oversikt over hvordan datamaterialet plasserer seg mot gyldighetsområdet til Digernes formel. Gyldighetsområdet er innenfor de grønne rammene, definert av to parametere. Hvert punkt representerer en lastekondisjon. | 9 |
| 3.3 | Oversikt over hvordan datamaterialet plasserer seg mot gyldighetsområdet til Hollenbachs metode for motstandsprediksjon. Gyldighetsområdet er definert av de røde rammene og hvert punkt indikerer en lastekondisjon. | 11 |
| 3.4 | De tre ulike «modusene» som tilsvarende «svake», «normale» og «gode» skroglinjer er testet ut for å se hvilken som passer best for dette datamaterialet. Avviket mot modellforsøk er plottet mot Froude tall, sort linje indikerer null avvik og y-aksen går fra -100% til 250% avvik mot modellforsøk (Negativt avvik betyr underpredikert motstand) | 12 |
| 3.5 | Oversikt over hvordan datamaterialet plasserer seg mot gyldighetsområdet til Holtrops metode for motstand. Gyldighetsområdet er definert av den blå rammen og hvert punkt representerer en lastekondisjon. | 15 |
| 3.6 | Oortmerssen benytter diagonalen av skroget for å beregne formfaktoren til et fartøy. Figuren illustrerer hvordan to koeffisienter skal beregnes | 16 |
| 3.7 | Oversikt over hvordan datamaterialet plasserer seg mot det estimerte gyldighetsområdet til metoden. Gyldighetsområdet er definert av de sorte rammene, og mellomrom mellom rammer indikerer «hull» i Oortmerssens datagrunnlag. Hvert punkt representerer en lastekondisjon. | 18 |
| 5.1 | Prosentvis avvik av totalmotstand mot modellforsøk er beregnet for alle lastekondisjoner og hastigheter. Resultatene for hver metode er plottet mot Froudetall. Null avvik er merket med sort linje og y-aksen går fra -100% til 250% avvik. ANN og Holtrop kunne ikke beregne motstanden for alle hastigheter og lastekondisjoner, disse vises som 0% avvik, men er ikke tatt med i beregningene av middel- og standardavvik. | 25 |

| | | |
|-----|--|------|
| 5.2 | Prosentvis middelavvik av totalmotstand mot modellforsøk er plottet for hver lastekondisjon og metode mot tre utvalgte parametere. Null avvik er markert med en horisontal linje. For de lastekondisjonene ANN eller Holtrop ikke kunne beregne, er avviket vist som 0%. Datene er basert på Tabell E.1 og E.2. Plot mot flere parametere er vist i Tillegg D | 26 |
| 5.3 | Prosentvis avvik av totalmotstanden mot modellforsøk ved antatt designhastighet (se Avsnitt 5.2) er plottet for hver lastekondisjon og metode mot tre utvalgte parametere. Null avvik er markert med en horisontal linje. For de lastekondisjonene ANN eller Holtrop ikke kunne beregne, er avviket vist som 0%. Plot mot flere parametere er vist i Tillegg D | 27 |
| 5.4 | Prosentvis avvik av totalmotstanden mot modellforsøk for alle lastekondisjoner og hastigheter er plottet som i Figur 5.1. Datene er behandlet i Matlab-tillegget «curve-fit tool» for å vise et 90% konfidensintervall basert på en linær interpolasjon. | 29 |
| A.1 | Grafisk fremstilling av fartløy-grunnlaget for MARINTEKs ANN-metode. Søylediagrammene viser antall fartøy mot utvalgte parameter | II |
| D.1 | Prosentvis avvik av totalmotstanden mot modellforsøk er plottet mot B/T forholdet til alle lastekondisjoner i materialet. Resultatene for både antatt designhastighet og middelavvik er plottet for alle metodene. Null avvik er markert med en horisontal linje. For de lastekondisjonene ANN eller Holtrop ikke kunne beregne, er avviket vist som 0% | IX |
| D.2 | Prosentvis avvik av totalmotstanden mot modellforsøk er plottet mot blokk-koeffisienten til alle lastekondisjoner i materialet. Resultatene for både antatt designhastighet og middelavvik er plottet for alle metodene. Null avvik er markert med en horisontal linje. For de lastekondisjonene ANN eller Holtrop ikke kunne beregne, er avviket vist som 0% | X |
| D.3 | Prosentvis avvik av totalmotstanden mot modellforsøk er plottet mot volumdeplasementet til alle lastekondisjoner i materialet. Resultatene for både antatt designhastighet og middelavvik er plottet for alle metodene. Null avvik er markert med en horisontal linje. For de lastekondisjonene ANN eller Holtrop ikke kunne beregne, er avviket vist som 0% | XI |
| D.4 | Prosentvis avvik mot av totalmotstanden modellforsøk er plottet mot L/B forholdet til alle lastekondisjoner i materialet. Resultatene for både antatt designhastighet og middelavvik er plottet for alle metodene. Null avvik er markert med en horisontal linje. For de lastekondisjonene ANN eller Holtrop ikke kunne beregne, er avviket vist som 0% | XII |
| D.5 | Prosentvis avvik av totalmotstanden mot modellforsøk er plottet mot designtrim i meter for alle lastekondisjoner i materialet. Resultatene for både antatt designhastighet og middelavvik er plottet for alle metodene. Null avvik er markert med en horisontal linje. For de lastekondisjonene ANN eller Holtrop ikke kunne beregne, er avviket vist som 0% | XIII |

Tabeller

| | | |
|-----|---|----|
| 3.1 | Gyldighetsområdet for MARINTEKs ANN metode for fiskefartøy, slik MARINTEK oppgir det. | 6 |
| 3.2 | Verdier for koeffisienter i Digernes formel, (Formel 3.1) | 8 |
| 3.3 | Gyldighetsområdet for Digernes formel slik det defineres av Digernes . . . | 8 |
| 3.4 | Gyldighetsområdet for Hollenbachs metode for motstandsprediksjon, slik det er definert for modusen «gode linjer» (Hollenbach (1998)) | 10 |
| 3.5 | Gyldighetsområdet til Holtrops statistiske metode for fiskefartøy slik det er definert i Holtrops tidligste artikkel (Holtrop (1977)) | 14 |
| 3.6 | Gyldighetsområdet for Oortmerssen formel som er basert på datagrunnlaget slik det er oppgitt i (Van Oortmerssen (1971)) | 17 |
| 4.1 | Oversikt over hvordan skrogparameterne fra MSF-prosjektet er endret systematisk basert på utvalgte parametere (Jullumstrø and Frostad (1989)) . | 20 |
| 5.1 | Oversikt over fargene og symbolene som er brukt konsekvent for å representere de ulike metodene gjennom hele rapporten. | 21 |
| 5.2 | Det prosentvise avviket for totalmotstanden til de ulike metodene mot modellforsøk er regnet ut for alle hastigheter og lastekondisjoner. Tabellen viser gjennomsnitt og standardavvik for middelavviket til hver lastekondisjon over alle hastigheter. Negativt middelavvik indikerer underprediksjon. Basert på data fra tabell E.1 og E.2 | 22 |
| 5.3 | Tre froude-tall intervaller er valgt, og middelavviket til totalmotstanden til hver metode er regnet ut i hvert intervall for alle lastekondisjoner. Tabellen viser gjennomsnittet og standardavvikene for de prosentvise avvikene for alle lastekondisjoner knyttet til de tre intervallene. Negativt middelavvik indikerer underprediksjon av motstand. Beregningene er basert på tabellene E.3 - E.8 | 23 |
| E.1 | Prosentvis middelavvik mot modellforsøk for alle lastekondisjoner er beregnet med alle metodene. Negativt avvik indikerer underprediktering av motstand. ANN og Holtrop kunne ikke beregne motstanden for alle fartøyene, dette er markert med «-» | XV |

| | | |
|-----|--|--------|
| E.2 | Standardavvik av motstandsprediksjon for hver lastkondisjon er beregnet basert prosentvis avvik for alle metodene. ANN og Holtrop kunne ikke beregne motstanden for alle fartøyene, dette er markert med «-» | XVI |
| E.3 | Prosentvis middelavvik mot modellforsøk for alle lastekondisjoner er beregnet med alle metodene for froude-tall lavere enn 0.2. Negativt avvik indikerer underprediktering av motstand. Ikke alle modeller er modellkjørt på så lave hastigheter, manglende data er indikert med «-» | XVII |
| E.4 | Standardavvik beregnet for alle fartøy for Froude tall lavere enn 0.2, sortert på metode. Merk: Grunnen for de manglende verdiene er at ikke alle fartøy er testet for så lave hastigheter | XVIII |
| E.5 | Middelavvik beregnet for alle fartøy for froude tall mellom 0.2 og 0.3 . . . | XIX |
| E.6 | Standardavvik beregnet for alle fartøy for froude tall mellom 0.2 og 0.3 . . | XX |
| E.7 | Middelavvik beregnet for alle fartøy for froude tall over 0.3 | XXI |
| E.8 | Standardavvik beregnet for alle fartøy for froude tall over 0.3 | XXII |
| G.1 | Oversikt over alle fartøy som utgjør datagrunnlaget | LXXIII |

Symbolliste

| | |
|--------------|--|
| L_{VL} | Vannlinjelengde [m] |
| L_{PP} | Lengde mellom perpendikulær [m] |
| L_{OS} | Lengde over overflate [m] |
| V | Hastighet [m/s] |
| F_N | Froudetall |
| R_N | Reynoldstall |
| B | Bredde på spant |
| S | Våt overflate [m ²] |
| ∇ | Volumdeplasement [m ³] |
| Δ | Vektdeplasement [tonn] |
| C_A | Empirisk korrelasjonskoeffisient |
| C_{AA} | Luftmotstandskoeffisient |
| C_{BD} | Motstandskoeffisient fra nedsenket akterspeil |
| C_F | Friksjonsmotstandskoeffisient |
| ΔC_F | Ruhetstillegg |
| C_R | Restmotstandskoeffisient |
| C_T | Totalmotstandskoeffisient |
| C_B | Blokk-koeffisient |
| C_P | Prismatisk koeffisient |
| R_T | Total slepemotstand [N] |
| $1 + k_0$ | Formfaktor |
| g | Tyngdens akselerasjon [9.81 m/s ²] |
| ν | Kinematisk viskositet [m ² /s] |
| ρ | Massetetthet [kg/m ³] |

Kapittel 1

Introduksjon

Under designprosessen av et fartøy er det viktig å kunne få et tidlig estimat på motstanden som er grunnlaget for videre arbeid i «designspiralen». Motstanden er en av de store kostnadsdriverne for et fartøy, sammen med stålvekten. Dette er viktig for at størrelsen på hovedmaskineriet kan estimeres før det gis et pristilbud veldig tidlig i prosjekteringsfasen. Det er for denne oppgaven empiriske metoder er best egnet.

De siste årene har industrien brukt mye ressurser på CFD beregninger og kunnskapen om ulike empiriske metoder og deres styrker og svakheter er det ikke like mye kunnskap om. Denne påstanden baserer seg på møter og samtaler med fagpersoner i og rundt den maritime industrien. Målet for denne oppgaven har derfor vært å kartlegge hvilke empiriske metoder som finnes for fiskefartøy, og se hvordan disse klarer å prediktere motstanden til et utvalg fiskefartøy. Det meste av arbeidet som er blitt gjort på dette feltet daterer seg tilbake til 60- og frem til 80-tallet, med unntak av Hollenbachs metode som ble publisert i 1998. Det har også kommet til nye verktøy, Artificial Neural Network, som er godt egnet til å lage motstandsprediksjoner på spissede datamateriale.

Det har ikke blitt publisert mange artikler om empiriske metoder siden metodene selv ble publisert. Metodene som behandles i denne oppgaven er, Oortmerssen formel (1971), Digernes Formel (1982), Holtrop (1984), Hollenbach (1998) og MARINTEKs ANN for fiskefartøy (2004). Av disse er Oortmerssen, Digernes og ANN metodene som er spesialisert mot fiskefartøy, mens Holtrop og Hollenbach er mer generelle metoder og er mest brukt.

Mitt arbeid er en naturlig forlengelse av Kjetil Leines diplomoppgave fra 1986, som er skrevet på NTNU i samarbeid med Fiskeriteknisk forskningsinstitutt (Leine (1986)). Leine undersøkte blandt annet Digernes og Oortmerssens formler, samt en tidligere versjon av Holtrop i sitt arbeid. Denne oppgaven benytter mye av den samme fremgangsmetoden, men på et nyere datamateriale. En betydelig del av datagrunnlaget i denne oppgaven er fra MARINTEKs forskningsprosjekt «Moderne skrogformer for fiskefartøy» som ble utført i 1987–1989. Dette forsøket undersøkte parameterendringer for fiskefartøy med tre ulike lengder.

Kapittel 2

Andre metoder for motstandprediksjon

Det finnes flere ulike metoder for å beregne motstanden til et skip. De fleste metodene beregner motstanden i stille vann, som er den antagelsen som legges til grunn i denne oppgaven. Etterhvert som teknologien har blitt videreutviklet opp gjennom historien, har også nye metoder kommet til, og gamle har blitt bedre. I nyere tid er det tilgangen på mer datakraft som har hatt størst betydning innenfor motstandsberging. Dette har gitt tilgang til avanserte CFD beregninger og mulighet til mer nøyaktige måleinstrumenter for modellforsøk.

Det finnes i dag flere alternativer for den som ønsker å prediktere motstanden til et skip i designfasen. Denne oppgaven tar for seg empiriske metoder, men disse er ikke de mest presise metodene. Modellforsøk er fortsatt regnet for å være den mest nøyaktige metoden å finne motstanden til et skip. I denne oppgaven brukes resultater fra modellforsøk som referanseverdi når avvik skal beregnes. De siste årene har også CFD blitt et verktøy som brukes mer og mer i skrogutforming og detaljstudier av for eksempel vedheng på skroget. Sammenlignet med Modellforsøk er CFD mindre kostnadskrevenende, og langt mer nøyaktig enn empiriske metoder. Styrken til de empiriske metodene er den raske beregningstiden og muligheten til å teste effekten av å endre parametere, før skrogfasongen fastsettes.

Jeg vil først presentere modelltesting og CFD beregning, før jeg tar for meg de empiriske metodene.

2.1 Modelltesting

Mange av skipene som produseres i dag gjennomgår modelltesting, for å bekrefte at skipet vil oppfylle kontraktsspesifikasjonene for hastighet med installert motorkraft. Modellforsøk er svært kostnadskrevenende, både i tid og penger. Det er derfor vanlig at kun det endelige designet testes for å begrense kostnadene.

Modellen er en nøyaktig, geometrisk nedskalering av det fullskala fartøyet. Skalaen som velges begrenses av størrelsen og fasilitetene til slepetanken som utfører testen.

Størrelsen på slepetanken begrenser størrelsen på modellen for å unngå refleksjon fra vegger, og høyeste hastighet det kan slepes i avgjøres av utstyret i modelltanken. Disse to hensynene styrer valget av modellskala for å oppnå likhet i Froudetall (Formel 2.1) for modell- og fullskala. Froude tallet sørger for korrekt skalering av gravitasjonskreftene som skaper en av de største motstandskomponentene, nemlig bølgemotstanden.

Det er hovedsakelig to større krefter som må skaleres fra fullskala til modellskala, *bølgemotstanden* og *friksjonsmotstanden*. Friksjonsmotstanden skaleres gjennom likhet i Reynoldstall (Formel 2.2), som ikke er mulig å kombinere med likhet i Froude tall. Siden det finnes en god formel for beregning av friksjonsmotstanden som er utarbeidet av ITTC (se Formel 2.3), benyttes denne for å finne friksjonsmotstanden i full skala. Som det fremgår av formelen for Reynoldstallet, det svært vanskelig å oppnå likhet i modell- og fullskala (modellhastigheten vil måtte bli uforholdsmessig høy). Det er derfor vanligere å teste modeller som krever Reynoldsskalering i vindtunell, dette fordi den kinematiske viskositeten er mye lavere i luft enn vann. Modellhastigheten kommer dermed ned på et mer fornuftig nivå.

$$F_N = \frac{V}{\sqrt{gL_{WL}}} \quad (2.1)$$

$$R_N = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad (2.2)$$

$$C_F = \frac{0.075}{(\log Rn - 2)^2} \quad (2.3)$$

Den vanligste metoden for å skalere opp den endelige motstanden, er å dele den opp i spesifikke komponenter. Dette gjøres for å kunne skille ut bølgemotstanden (også kalt restmotstand) fra den totale motstanden. Disse komponentene uttrykkes med dimensjonsløse koeffisienter (vist i Formel 2.4). Disse plukkes så fra hverandre i modellskala for å settes sammen i fullskala slik som Formel 2.5 viser.

$$C_X = \frac{R_X}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S} \quad (2.4)$$

Det finnes også en mindre, men betydelig motstandskomponent som kalles viskøs trykkmotstand. Dette er en motstand som påvirkes både av gravitasjons- og friksjonskreftene, denne er av den grunn vanskelig å skalere som en egen motstandskomponent. Det er flere fremgangsmåter som kan benyttes for å kompensere for denne effekten. MARINTEK legger den inn i restmotstanden sammen med bølgemotstanden, mens for eksempel Holtrop legger den inni formfaktoren for å kunne skille ut bølgemotstanden som en egen komponent. Man kan derfor se at formfaktoren til MARINTEK (Fathi et al. (2012)) er

lavere enn den Holtrop (Holtrop (1984)) oppgir, mens C_R koeffisienten til MARINTEK er større enn C_R koeffisienten til Holtrop.

$$\begin{aligned} C_{Tm} &= (1 + k_0) \cdot C_{Fm} + C_{AAm} + C_{DBm} + C_R \\ C_{Ts} &= (1 + k_0) \cdot (C_{Fs} + \Delta C_F) + C_R + C_{AAs} + C_{DBs} + C_{AppS} + C_A \end{aligned} \quad (2.5)$$

| | | |
|--------------|---|---|
| C_T | = | Totalmotstandskoeffisient |
| $1 + k_0$ | = | Formfaktor for skrogets fyldighet |
| C_F | = | Friksjonsmotstandskoeffisient (ITTC-'57) |
| ΔC_F | = | Ruhetstillegg for fullskala |
| C_R | = | Restmotstandskoeffisient |
| C_{AA} | = | Luftmotstandskoeffisient |
| C_{BD} | = | Tilleggsmotstand fra nedsenket akterspeil |
| C_{AP} | = | Vedhengsmotstand |
| C_A | = | Korrelasjonskoeffisient mellom modell og fullskala motstand |

Det inngår ikke i denne oppgaven å gå nærmere inn på detaljene i modellskalering, men for den interesserte leser finnes det flere gode referanser i kildelisten:

- Steen (2013)
- ITTC (2011)
- Fathi et al. (2012)

2.2 CFD metoder

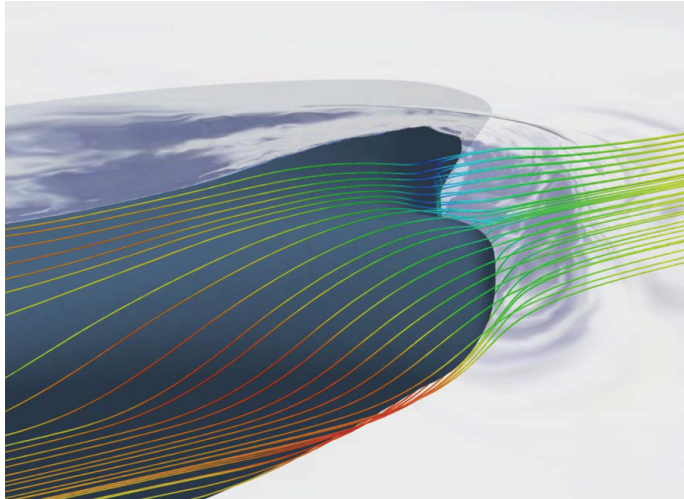
CFD (Computational Fluid Dynamics, ed.) tools are being used more and more extensively in practical ship hull form design today. Viscous-flow computations are used to provide detailed predictions of the flow around the hull, the wake field, occurrence of flow separation, for appendage alignment, etc. Based on the predictions and the insight obtained the hull form design may be modified to improve the flow quality, prior to any model testing. This CFD use already has enabled significant advances in design.

However, when it comes to the final prediction of the power and RPM of the ship at full scale, in most cases a model of the final or near-final form is tested in a model basin. The performance predictions based on the model tests are still considered decisive. (Raven et al.)

Sitatet over, beskriver godt hvor CFD står i dag, og det er helt klart at det har vært en utrolig fremgang for denne teknologien de siste tiårene. Det jobbes i dag mye med å utvikle CFD koder som løser problemet med fri væskeoverflate (bølgedannelse rundt skroget) på en effektiv måte. Programvarene knyttet til maritim CFD, ligger i dag langt

bak fly-industrien i å utvikle CFD koder. Flyindustrien har lagt ned betydelige summer i forskning og utvikling siden de første superdatamaskinene dukket opp på 60- og 70-tallet. Dette fører til at beregningene på skip er ressurskrevende, beregningsmetodene er heller ikke like effektive og nøyaktige. Dette medfører at en nøyaktig CFD beregning på et fartøy kan ta flere dager, ja opptil uker om man trenger høy oppløsning av medstrømmen.

Den store fordelen med CFD er at det er enkelt å endre design etter en test, noe som er mye mer kostnads-krevende med modellforsøk. Det kan derfor forventes at CFD vil bli langt utbredt i den maritime næringen etterhvert som tilgjengelig datakraft øker.



Figur 2.1: Et eksempel på anvendelse av CFD for å se strømningsbilde over en bulb
(kilde: Croonenborghs et al. (2012))

Kapittel 3

Empiriske metoder

3.1 Artificial Neural Network metode for fiskefartøy

MARINTEK tilbyr gjennom sin programpakke ShipX en Artificial Neural Network (ANN) metode. ANN er en kompleks metode der et system ”lærer” ved å innhente informasjon fra mange modellforsøk (Fathi et al. (2012)). Metoden samler og utvikler en mengde sammenhenger mellom inndata og resultater, for så å optimalisere disse sammenhengene for igjen å minimere avvikene. Resultatene fra ANN metoder blir dermed avhengig av datagrunnlaget de er basert på. MARINTEK har utviklet en egen ANN metode for fiskefartøy som er basert på modellforsøk fra 76 skip. En oversikt over dette datamaterialet er vist i Tillegg A.

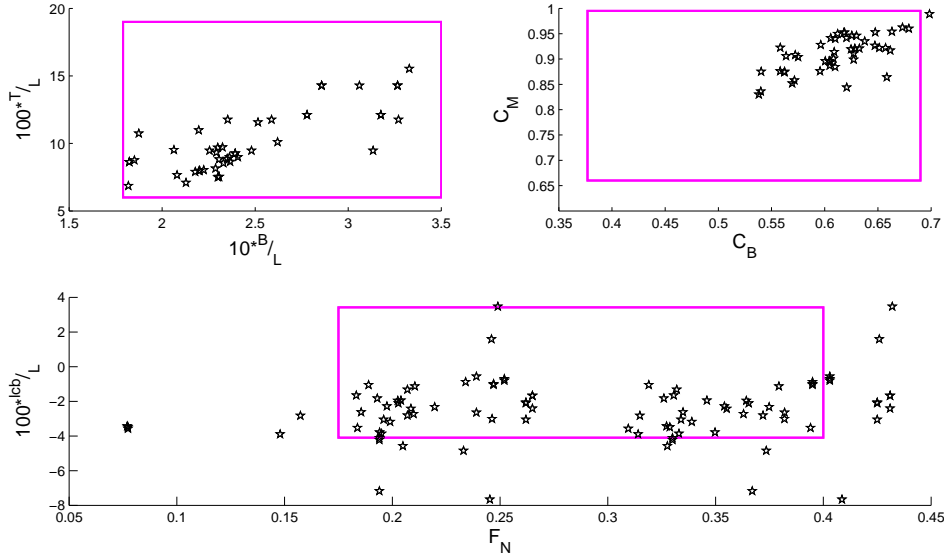
Gyldighetsområde

Datamaterialet i denne oppgaven er modelltestet hos MARINTEK i perioden 1987-2014, de fleste fartøyene fra denne perioden inngår i underlagsmaterialet for metoden. Dette bør derfor hensyntas under vurderingen av resultatene.

Gyldighetsområdet til metoden er oppgitt av MARINTEK i brukermanualen til ShipX Speed and Powering (Fathi et al. (2012)), og gjengitt i Tabell 3.1. Det viste seg at flere av fartøyene i mitt datagrunnlag hadde oppdriftssenteret lengere bak enn 4% av L_{VL} og kunne derfor ikke beregnes.

Tabell 3.1: Gyldighetsområdet for MARINTEKs ANN metode for fiskefartøy, slik MARINTEK oppgir det.

| $10 \cdot B/L$ | $100 \cdot T/L$ | C_B | F_N | C_M | $100 \cdot lcb/L$ |
|----------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|
| 1.79–3.50 | 6–19 | 0.377–0.690 | 0.175–0.400 | 0.660–0.995 | -4.10–3.42 |



Figur 3.1: Oversikt over hvordan datamaterialet plasserer seg mot gyldighetsområde til MARINTEKs ANN-metode. Gyldighetsområde er vist med fiolett ramme basert på to parametere. Hvert punkt representerer en lastekondisjon.

Hvordan metoden er benyttet

ANN-metoden er en av metodene som er integrert i ShipX, og alle fartøyene er derfor lagt inn og kjørt her. Det var gjennomgående to verdier som ble overskredet mot gyldighetsområdet, oppdriftscenterets plassering og Froudetall. Fra MARINTEKs database har jeg tilgang på langskips plassering av oppdriftssenter i meter fra $L_{pp}/2$. ShipX oppgir ikke om lcb skal oppgis som prosent av L_{PP} eller L_{VL} , men siden svært mange av fartøyene falt utenfor gyldighetsområdet ved å benytte L_{PP} , har jeg valgt å benytte L_{WL} . For de skipene som var testet for Froude tall utenfor gyldighetsområdet, ble ANN brukt for de hastighetene som gav aksepterte Froude tall. ANN metoden er derfor ikke testet for alle fartøyene eller alle hastigheter.

3.2 Digernes formel

Digernes formel er en ren regresjonsformel (se Formel 3.1), utarbeidet ved MARINTEK i 1982. Formelen er bygget rundt erfaringen om at motstanden i stor grad er påvirket av deplasement og hastigheten til et fartøy (Digernes (1982)). Ved å utarbeide et uttrykk som er logaritmisk lineært, gir det mulighet til å benytte lineær regressjon for å finne koeffisientene til formelen. Som det fremgår av den endelige formelen (Formel 3.1), er det i tillegg benyttet geometriske forhold som antas å ha innvirkning på motstanden. Verdier av koeffisientene er vist i Tabell 3.2

$$R = a \cdot \left(\frac{L_{WL}}{B}\right)^b \cdot \left(\frac{B}{T}\right)^c \cdot \nabla^\delta \cdot e^{\beta' \cdot F_n} \quad (3.1)$$

Formelen er basert på motstandsdata fra 33 modellforsøk, og senere kontrollert opp mot 280 andre fartøy (Digernes (1983)). Korrelasjonskoeffisienten til regresjonen er beregnet til $R^2 = 0.995$, noe som er svært bra. Dette tyder på at formelen er istand til å følge motstandskurven godt for skipene som utgjør grunnlaget til metoden. Det er verdt å nevne at datagrunnlaget består av fartøy uten bulb.

Tabell 3.2: Verdier for koeffisienter i Digernes formel, (Formel 3.1)

| a | b | c | δ | β' |
|-----------------------|-------|-------|----------|----------|
| $2.956 \cdot 10^{-4}$ | 0.802 | 0.745 | 1.113 | 15.605 |

Gyldighetsområde

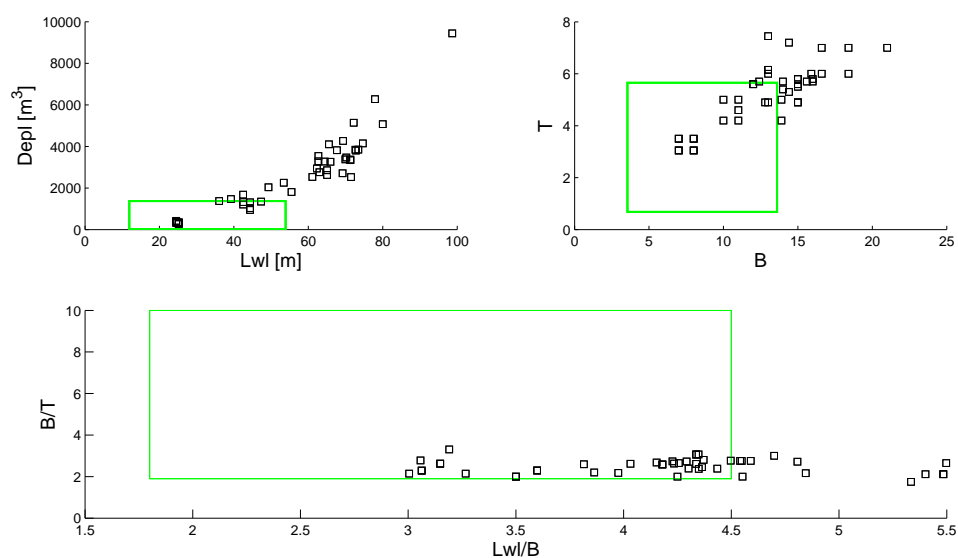
Digernes oppgir selv gyldighetsområdet for formelen sin med seks parameterverdier og et Froudetall interval (Se Tabell 3.3). Dette er yttergrensene til fartøyene formelen baserer seg på. Siden regresjonen kun baserer seg på fiskefartøy, ser vi at de fleste referansefartøyene i denne oppgaven plasserer seg innenfor gyldighetsområdet (Figur 3.2). Det er de største skipene som faller utenfor absoluttverdiene, dette bekrefter at data-materialet baserer seg på mindre skip. Men for de dimensjonsløse parameterne, faller de fleste skipene innenfor gyldighetsområdet.

Hvordan metoden er benyttet

Digernes formel er en eldre, og lite benyttet formel. Jeg skrev derfor et Matlab skript for å regne ut motstanden i henhold til Digernes formel. Dette skriptet er lagt ved i Tillegg B. Alle fartøyene er testet uten hensyn til gyldighetsområdet.

Tabell 3.3: Gyldighetsområdet for Digernes formel slik det defineres av Digernes

| $L_{VL}[m]$ | $B[m]$ | $T[m]$ | $\nabla[m^3]$ | L_{VL}/B | B/T | F_N |
|-------------|-----------|-----------|---------------|------------|----------|-------------|
| 11.9–53.9 | 3.55–13.6 | 0.68–5.65 | 17.6–1376 | 1.8–4.5 | 1.9–10.0 | 0.223–0.494 |



Figur 3.2: Oversikt over hvordan datamaterialet plasserer seg mot gyldighetsområdet til Digernes formel. Gyldighetsområdet er innenfor de grønne rammene, definert av to parametere. Hvert punkt representerer en lastekondisjon.

3.3 Hollenbachs predisjon av motstand

Hollenbachs metode er en moderne metode fra 1998, som er mye brukt i dag. Metoden er laget for handelsskip og er utviklet basert på modelldata fra slepetanken i Wien. Dette er en omfattende metode som tar i bruk et større datamaterialet og mer sofistikert formel enn de andre metodene i denne oppgaven. Metoden har også tre “moduser”, hhv. svake, vanlige og gode skroglinjer som er ment å gi rom for skip med større eller mindre begrensninger i skrogutformingen. Nedenfor undersøkes det nærmere hvilken av disse modusene som bør anvendes på fiskefartøy.

Gyldighetsområde

Hollenbach er den mest brukte metoden i dag for å estimere motstand i tidlig prosjekteringsfase. Den er satt sammen av flere empiriske metoder og krever relativt mye input informasjon. Dette gjør at metoden oppgis å ha et romslig gyldighetsområdet (Hollenbach (1998)), men allikevel faller en del av denne oppgavens fartøyer utenfor dette gyldighetsområdet. Gyldighetsområdet er illustrert i Figur 3.3, og man ser at det er spesielt på L/B - og $L_{PP}/\nabla^{1/3}$ - forholdet fiskefartøyene skiller seg ut fra Hollenbachs datagrunnlag.

Tabell 3.4: Gyldighetsområdet for Hollenbachs metode for motstandsprediksjon, slik det er definert for modusen «gode linjer» (Hollenbach (1998))

| | $L_{PP}[m]$ | $L_{PP}/\nabla^{1/3}$ | C_B | L/B | B/T | L_{OS}/L_{VL} | L_{VL}/L_{PP} |
|----------------|-------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------------|-----------------|
| Enkel propell | 42–205 | 4.49–6.01 | 0.60–0.83 | 4.71–7.11 | 1.99–4.00 | 1.00–1.05 | 1.00–1.06 |
| Dobbel propell | 30.6–206.8 | 4.41–7.27 | 0.51–0.78 | 3.96–7.13 | 2.31–6.11 | 1.00–1.05 | 1.00–1.07 |

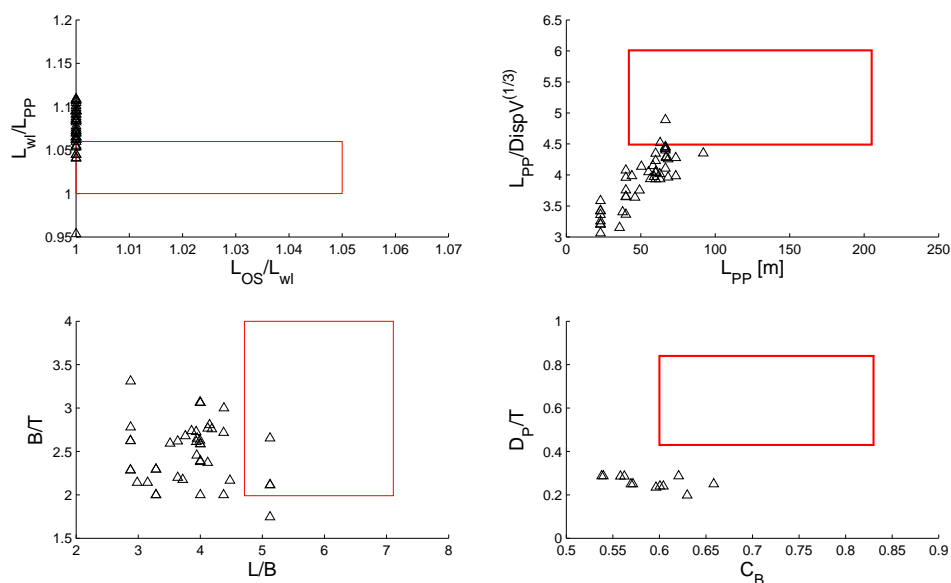
Hvordan metoden er benyttet

Hollenbach er en av metodene som er integrert i ShipX, alle skipene er her beregnet for alle hastigheter. Det er verdt å merke seg at siden jeg ikke har hatt linjetegningene for alle fartøyene, har jeg ikke hatt muligheten til å finne Lengde over overflate (L_{OS}) slik Hollenbach definerer den. Jeg har derfor valgt å benytte vannlinjelengden istedenfor L_{OS} for alle fartøyene slik at alle beregnes på likt grunnlag. Dette betyr at bulblengden ikke er med i L_{OS} for fartøyene i materialet.

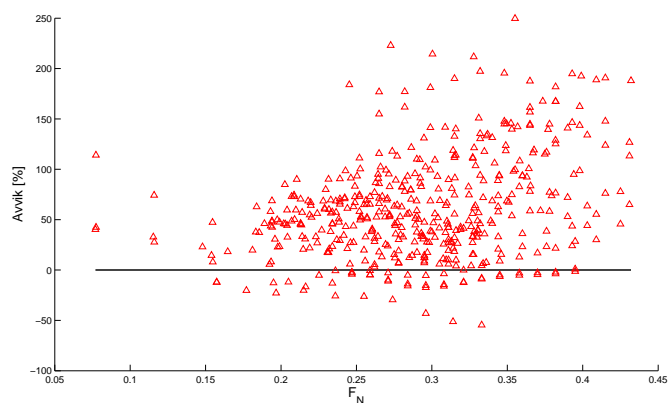
Hollenbach gir brukeren muligheten til å spesifisere om fartøyet har gode, vanlige eller svake linjer i beregningen av motstand. Vanlige er naturlig nok gjennomsnittet, eller den beste regresjonen mot det opprinnelige datamaterialet. Gode og svake linjer er hhv. øvre og nedre grense for 95% konfidensintervall i det samme datamaterialet. Dette er trolig et nyttig verktøy når en fartøykategori som er lite representert i datamaterialet skal testes. Det var ikke klart for meg hvilken modus som ville være best egnet. Fiskefartøy har ofte strenge krav til stabilitet og deplasement (lastekapasitet), slik at skrogformen sjeldent er helt optimalisert for motstand. Bør da modus velges for om skroget er godt

designet mot de ekstreme skrogdataene (Bla. lavt L/B forhold). Som de ofte er, eller bør de sammenlignes mot handelsfartøy som ofte har en mer optimal form.

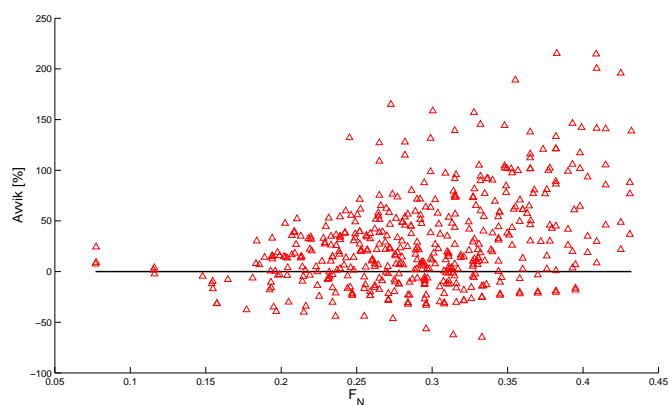
For å finne ut dette, plottet jeg avviket for hver modus mot Froude tall for å se om det var en modus som var klart bedre enn de andre. Resultatet er vist i Figur 3.4. Som det kommer frem, er det modusen for gode linjer som bør anvendes på fiskefartøy. Det er denne modusen som er brukt i resten av denne oppgaven.



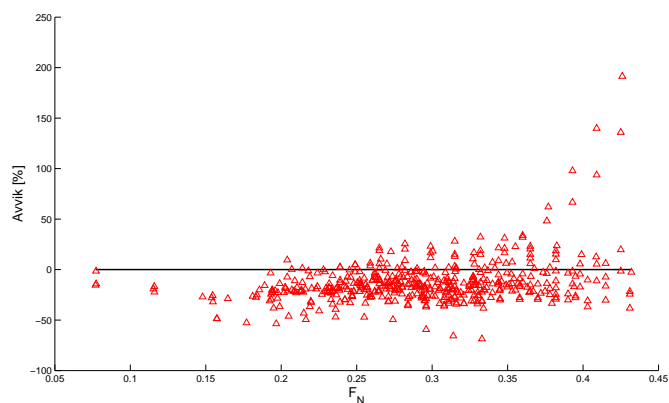
Figur 3.3: Oversikt over hvordan datamaterialet plasserer seg mot gyldighetsområdet til Hollenbachs metode for motstandsprediksjon. Gyldighetsområdet er definert av de røde rammene og hvert punkt indikerer en lastekondisjon.



(a) Svake linjer



(b) Vanlige linjer



(c) Gode linjer

Figur 3.4: De tre ulike «modusene» som tilsvarer «svake», «normale» og «gode» skroglinjer er testet ut for å se hvilken som passet best for dette datamaterialet. Avviket mot modellforsøk er plottet mot Froude tall, sort linje indikerer null avvik og y-aksen går fra -100% til 250% avvik mot modellforsøk (Negativt avvik betyr underpredikert motstand)

3.4 Holtrops statistiske metode for motstand

Holtrops metode er mer enn 10 år eldre enn Hollenbach, men er fortsatt mye brukt også i dag. Den er, som Hollenbach, laget for handelsskip og dermed en annen type skrofasong enn det fiskefartøy ofte har. Metoden baserer seg på modellforsøk og fullskala data tilgjengelig fra den nederlandske skipsmodelltanken. Metoden bygger på den samme oppdelingen av motstand som modellforsøk (Avsnitt 2.1), slik at totalmotstanden kan uttrykkes ved Formel 3.2.

$$R_{Total} = R_F(1 + k_1) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A \quad (3.2)$$

| | | |
|-----------|---|---|
| R_F | = | Friksjonsmotstand (ITTC-'57) |
| $1 + k_1$ | = | Formfaktor for skrogets fyldighet |
| R_{APP} | = | Vedhengsmotstand |
| R_W | = | Bølgemotstand |
| R_B | = | Økt trykkmotstand fra bulb nær vannoverflaten |
| R_{TR} | = | Økt trykkmotstand fra neddykket akterspeil |
| R_A | = | Korrelasjonskoeffisient mellom modell og fullskala motstand |

Som et resultat av hvor viskøs-trykk motstand «plasseres» i formelen, er det en signifikant forskjell på formfaktoren Holtrop benytter sammenlignet med for eksempel MARINTEK. Holtrop ønsker å presentere en adskilt bølgemotstand i R_W , og plasser derfor viskøs-trykk motstand i formfaktoren. Sammenlignet med MARINTEK, som benytter Prohaskas metode (ITTC (2011)) og dermed vil ende opp med viskøs-trykk motstand i restmotstanden (R_R), blir de individuelle motstandskomponentene ikke direkte sammenlignbare.

I sin diplomoppgave konkluderte Kjetil Leine at Holtrop ikke er spesielt egnet for fiskefartøy (Leine (1986)). Jeg har likevel valgt å ta med denne metoden av to årsaker: (1) Det har kommet en revisjon siden Leine skrev sin diplomoppgave. (2) Holtrop ligger forhåndsprogrammert i ShipX, det er derfor minimalt med merarbeid knyttet til å teste modellene også for Holtrops metode. Den Revisjonen som vil ha størst betydning for denne oppgaven er en omformulering av formfaktoren. Den «nye» formfaktoren tar høyde for akterskipsutformingen ved å gi brukeren mulighet til å definere denne. I denne oppgaven har jeg brukt «Pram with Gondola» for alle fartøyene, som er det samme som «Barge-form». Alle MSF fartøyene har barge-form, de aller fleste av de andre fartøyene har også dette (Datagrunnlaget jeg har hatt tilgang til kan ikke bekrefte dette, men jeg har antatt at alle fartøyene har barge-form, noe som kan forsvares gjennom mitt kjennskap til de fleste av disse fartøyene). «Pram with Gondola» skal gi en reduksjon i Holtrops i formfaktor og dermed senke totalmotstanden.

Gyldighetsområde

Holtrops metode er ikke primært ment for fiskefartøy, men heller tradisjonelle handelsfartøy. Metoden ønsker likevel å være en generell metode og Holtrop oppgir i sin tidligste

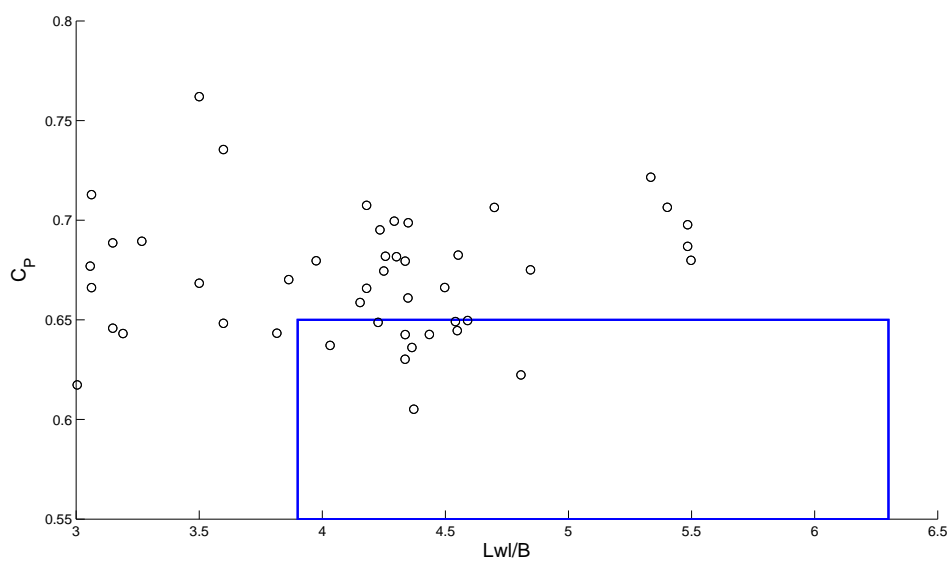
Tabell 3.5: Gyldighetsområdet til Holtrops statistiske metode for fiskefartøy slik det er definert i Holtrops tidligste artikkel (Holtrop (1977))

| L_{VL}/B | C_P | $F_{N,maks}$ |
|------------|-----------|--------------|
| 3.9–6.3 | 0.55–0.65 | 0.38 |

artikkel (Holtrop (1977)), et spesifikt gyldighetsområde som er gjengitt i Tabell 3.5. Dette området er ikke like definert som de andre metodene, men parameterne som brukes er dimensjonsløse og beskriver skrogformen rimelig bra. Som det fremgår av Figur 3.5 ligger en stor del av mitt datamateriale utenfor gyldighetsområde. Dette er kanskje ikke overraskende med tanke på Leines erfaringer, men det er viktig å påpeke at det har kommet revideringer av metoden i etterkant av Leines arbeid.

Hvordan metoden er benyttet

Holtrop er den tredje metoden som er en del av ShipX' «Speed and Powering». Som gyldighetsområdet indikerer, er det flere fartøyer som ikke ble beregnet da L_{VL}/B forholdet var for lavt. Jeg har ikke hatt tilgang på alle linjetegningene så det har ikke vært mulig å finne innløpsvinkelen ved baugen. Vannlinjekoeffisienten har heller ikke vært oppgitt for hele datamaterialet. Jeg har benyttet muligheten ShipX gir til å estimere disse parameterne. Det ble også anbefalt å ikke benytte muligheten for å regne med bulb, et råd jeg har fulgt.



Figur 3.5: Oversikt over hvordan datamaterialet plasserer seg mot gyldighetsområdet til Holtrops metode for motstand. Gyldighetsområdet er definert av den blå rammen og hvert punkt representerer en lastekondisjon.

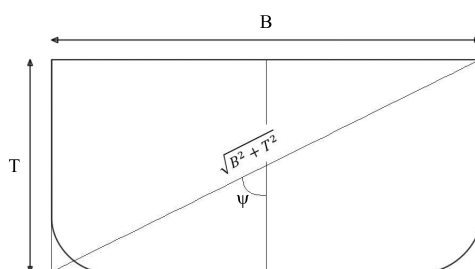
3.5 Oortmerssen formel for slepemotstand

Oortmerssens formel for slepemotstand og propulsjonseffekt er en av de tidligste empiriske metodene, der datagrunnlag og matematikk ble benyttet i utledningen. Valg av parametre og formuleringen av polynomet som utgjør formelen er utledet av bølgemotstanden for et kort skip. Koeffisientene er funnet gjennom regresjon av et større datamateriale bestående av 93 modellforsøk av tilfeldige fiskefartøy og taubåter. Metoden ligner derfor mye på Digernes' formel, men fremgangsmåten er mer sofistikert.

Som et utgangspunkt for beregning av en egen form faktor, benytter Oortmerssen Granvilles (Granville (1956)) empiriske formel. Han tar utgangspunkt i at forholdet $\frac{C_B}{L/B}$ er en god parameter for å bestemme form faktoren. Han ender opp med en formel for form faktor som vist i Formel 3.3. Betydningen av ψ er vist i Figur 3.6, mens C er en koeffisient som kan bestemmes ut fra forsøk. Den anbefalte verdien for C er oppgitt til 139. Oortmerssen konkluderer i sin artikkel at formfaktoren ikke bidrar til å øke presisjonen nevneverdig, og fjerner den derfor fra den endelige formelen. Jeg har testet både med og uten formfaktor, og formfaktoren øker faktisk avviket for dette datamaterialet. Resultatene som presenteres er derfor regnet uten formfaktor.

$$\begin{aligned} k &= C \cdot \left[\frac{C_B}{L/\sqrt{B^2 + T^2}} \right]^2 \cdot \sin^2 2\psi \\ &= C \cdot \frac{C_B^2}{\left(\frac{L}{B}\right)^2 \cdot \left[\left(\frac{B}{T}\right)^2 + 1\right]} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Oortmerssen utleder restmotstandsfunksjonen fra bølgemønsteret langs skroget. Utgangspunktet er bølgemønsteret rundt en todimensjonal trykkfordeling, som han har beregnet bølgemotstanden til. Metoden er ment for små skip, og forenklingen som gjøres er å fjerne det parallelle midtskipet. Han uttrykker også det divergerende bølgemønsteret i polynomet. Til slutt forenkles hele uttrykket for gi en bedre korrelasjon med sammenligningsdataene.



Figur 3.6: Oortmerssen benytter diagonalen av skroget for å beregne formfaktoren til et fartøy. Figuren illustrerer hvordan to koeffisienter skal beregnes

Tabell 3.6: Gyldighetsområdet for Oortmerssen formel som er basert på datagrunnlaget slik det er oppgitt i (Van Oortmerssen (1971))

| $L_D[m]$ | lcb | B/T | L_D/B | $\nabla[m^3]$ | $S[m^2]$ | C_P | C_M |
|----------|--------|----------|---------|---------------|----------|----------|-----------|
| 16–72 | -4.2–7 | 1.9–2.95 | 3.4–6.2 | 0–2850 | 0–1200 | 0.55–0.7 | 0.76–0.94 |

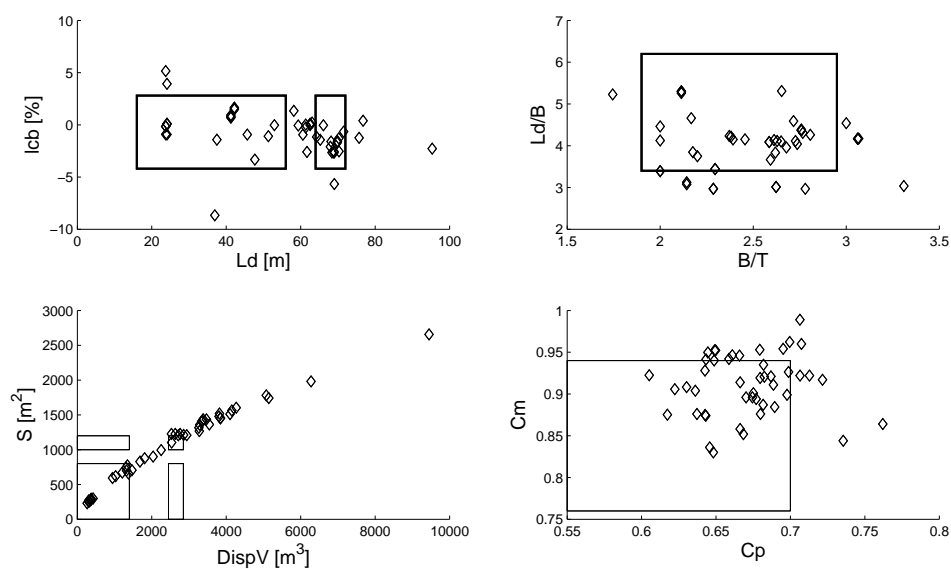
Gyldighetsområde

Oortmerssen formel er utledet og bygger på data fra slepeforsøk av fiskefartøy og taubåter (Van Oortmerssen (1971)). Den er basert på vesentlig eldre fartøy, enn det som behandles i denne oppgaven. Oortmerssen definerer ikke gyldighetsområdet sitt selv, slik som de andre metodene som er behandlet. Han oppgir istede datagrunnlaget sitt med søylediagram, og jeg har på bakgrunn av dette formulert et gyldighetsområde. Gyldighetsområde har jeg presentert og tallfestet i Tabell 3.6. Oortmerssen har noen «hull» i datamaterialet sitt, dette har jeg prøvd å illustrere i Figur 3.7 som også viser hvordan mitt datamateriale plasserer seg mot dette gyldighetsområdet. Fartøyene i denne oppgaven plasserer seg stort sett innenfor gyldighetsområdet definert av dimensjonsløse parameter, men det er tydelig at jeg her tester større fartøyer enn de Oortmerssen benyttet i sin tid. Dette behøver nødvendigvis ikke ha stor betydning, da skrogformene ser ut til å ha mye til felles.

Hvordan metoden er benyttet

Jeg var nødt til å lage et Matlab skript for å beregne motstanden med Oortmerssen sin metode, dette skriptet er vist i Tillegg C. Det er ikke tatt hensyn til gyldighetsområdet i beregningene, slik at alle fartøy er beregnet for alle hastigheter. Oortmerssen benytter halve innløpsvinkelen i baugen, noe som ikke har vært oppgitt for mitt datamateriale. Jeg har derfor benyttet 30 grader for alle fartøy. Dette er ikke helt presist, men verdien er valgt basert på et gjennomsnitt av målinger fra linjetegninger til MSF-serien.

Det er viktig å påpeke at resultatene fra Matlab-skriptet mitt for Oortmerssens metode nok ikke er helt pålitelige. Denne antagelsen baseres på en gjennomgang mot et eksempel i Oortmerssens artikkel (Van Oortmerssen, 1971, Appendix 2) hvor min kode ikke klarer å reprodusere de samme resultatene. Jeg har forsøkt å forfølge feilen bakover i utregningen, og den virker til å komme fra koeffisientene $d_{3,i}$, $d_{4,i}$, f_3 og f_4 som er oppgitt i Oortmerssens artikkel. Jeg har forsøkt å kontakte fagpersoner som har brukt metoden tidligere, men svarene jeg har fått er at dette ligger for langt tilbake i tid til å kunne hjelpe meg i denne oppgaven.



Figur 3.7: Oversikt over hvordan datamaterialet plasserer seg mot det estimerte gyldighetsområdet til metoden. Gyldighetsområdet er definert av de sorte rammene, og mellomrom mellom rammer indikerer «hull» i Oortmerssens datagrunnlag. Hvert punkt representerer en lastekondisjon.

Kapittel 4

Datamateriale

Jeg har i arbeidet benyttet et spisset datamaterialet sammenlignet med tidligere arbeider som er presentert i kapittel 1. Dette er en naturlig konsekvens, knyttet til målet med denne oppgaven, som er å finne den best egnede motstandsprediksjonen for norske fiskefartøyer. Datamaterialet mitt baserer seg på to kilder. En åpen kilde, som er et forskningsprosjekt i regi av MARINTEK, Moderne Skrogformer for Fiskefartøy (MSF). MSF er et parameterforsøk på fiskefartøyer utført i tidsrommet 1987-89 med mål om å forbedre skrogmotstand og sjøegenskaper for den fremtidige norske fiskeriflåten. Den andre kilden er konfidensiell, men mange av fartøyene i dette datamaterialet kan ansees som en videreutvikling av MSF-prosjektet. Til sammen utgjør datagrunnlaget 30 fartøy og 48 lastekondisjoner.

4.1 Moderne Skrogformer for Fiskefartøy

MSF er et omfattende forskningsprosjekt som ble utført med støtte fra Norges Fiskeriforskningsråd (NFFR), Fiskeridepartementet, Olje- og Energidepartementet og Norsk skipsbyggingsindustri. Formålet med prosjektet var å utforske nye design trender innenfor skrogutforming og hvilke muligheter som datidens nyvinninger gav. Prosjektet var et parameterforsøk som tok utgangspunkt i tre lengder og varierte lengde-bredde-forholdet og blokk-koeffisienten for disse. Oversikt over disse fartøyene er vist i Tabell 4.1.

Dataene for disse fartøyene er hentet fra MARINTEKs egne rapporter fra prosjektet. Alle fartøyene er oppgitt med design og ballast kondisjon, og motstanden er beregnet ut i fra rapportert totalmotstandskoeffisient. Til sammen utgjør dette datamaterialet 9 fartøy og 18 lastekondisjoner.

4.2 Konfidensielle fartøy

Dette datamaterialet er et variert materiale hva fartøytyper og størrelser angår. Jeg har for dette materialet hatt tilgang til hoveddimensjoner og beregnede motstandskoeffisienter fra modellforsøk utført av MARINTEK de siste 15 årene.

Tabell 4.1: Oversikt over hvordan skrogparameterne fra MSF-prosjektet er endret systematisk basert på utvalgte parametere (Jullumstrø and Frostad (1989))

| Fartøykategori | | Skrogalternativ | | | | |
|----------------|--------|-----------------|-------|-------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 2K | 3 | 4 |
| I Lpp=23.0m | $B(m)$ | 7.0 | 8.0 | 8.0 | 8.0 | |
| | C_B | 0.57 | 0.57 | 0.57 | 0.66 | |
| | L/B | 3.285 | 2.875 | 2.875 | 2.875 | |
| II Lpp=40.0m | $B(m)$ | 10.0 | 11.0 | | | 13.9 |
| | C_B | 0.60 | 0.60 | | | 0.60 |
| | L/B | 4.0 | 3.636 | | | 2.877 |
| III Lpp=60.0m | $B(m)$ | 15.0 | | | 15.0 | |
| | C_B | 0.63 | | | 0.68 | |
| | L/B | 4.0 | | | 4.0 | |

Av hensyn til kilden, er det gjort en avtale om ikke å identifisere fartøy fra dette materialet. Resultatene vil derfor hovedsakelig presenteres på en slik måte at det ikke vil være mulig å identifisere geometriske eller motstandsdata for fartøy fra dette materialet. Til sammen utgjør dette 20 fartøy og 30 lastkondisjoner og utgjør dermed hoveddelen av det totale materialet.

Kapittel 5

Resultater

Formålet med denne oppgaven er å produsere tallfestede avvik for totalmostanden, samt å fremstille disse på en oversiktlig måte. En utfordring har vært at jeg ikke har hatt noen arbeidsteori for hva resultatene kunne komme til å vise. Fremgangsmåten har dermed blitt preget av å lete «i blinde», for å se om det fremkom noe som kan ha praktisk anvendelse. Da resultatene heller ikke viser noen konkrete funn, bærer dette kapitlet preg av å presentere en god del resultater uten en tydelig rød tråd. Jeg har valgt å presentere de generelle resultatene slik det er vist i Tabell 5.2, og deretter gi leseren et bedre grunnlag for å se spredningen blandt enkeltresultatene, gjennom ulike grafiske fremstillinger.

For å gjøre det enklere å få en oversikt over grafene har jeg gjennomgående benyttet de samme fargene og symbolene for hver metode. Dette systemet er vist i Tabell 5.1.

5.1 Avvik for totalmotstanden

For å kunne gi en objektiv vurdering av de ulike metodene, har jeg benyttet statistikk for å sette tall på avviket. Jeg har valgt å ta utgangspunkt i det prosentvise avviket mot modellforsøk (Formel 5.1). Et forholdsmessig avvik gir en dimensjonsløs verdi, slik at ulike fartøy og hastigheter kan sammenlignes.

For å vise et mer generelt bilde av treffsikkerheten til metodene over hele hastig-

Tabell 5.1: Oversikt over fargene og symbolene som er brukt konsekvent for å representere de ulike metodene gjennom hele rapporten.

| Metode | Farge | Symbol |
|-------------|---------|--------|
| ANN | Fiolett | ☆ |
| Digernes | Grønn | □ |
| Holtrop | Blå | ○ |
| Hollenbach | Rød | △ |
| Oortmerssen | Sort | ◇ |

Tabell 5.2: Det prosentvise avviket for totalmotstanden til de ulike metodene mot modellforsøk er regnet ut for alle hastigheter og lastekondisjoner. Tabellen viser gjennomsnitt og standardavvik for middelavviket til hver lastekondisjon over alle hastigheter. Negativt middelavvik indikerer underprediksjon. Basert på data fra tabell E.1 og E.2

| | Middelavvik | Standardavvik |
|-------------|-------------|---------------|
| ANN | 2.3011 | 13.1306 |
| Digernes | 13.0064 | 14.3315 |
| Hollenbach | -13.6922 | 16.4739 |
| Holtrop | 4.8853 | 15.6854 |
| Oortmerssen | 34.1260 | 30.3128 |

hetsområdet har jeg også beregnet middelavvik og standardavvik for hver lastekondisjon for fartøyene (Formel 5.2 og 5.3). Middelavviket avslører om metoden ligger langt fra modellresultatene. Et scenario der middelavviket vil kunne gi et galt inntrykk, er en metode som gir et annet stigningstall på motstandskurven. Og som krysser modellforsøkets motstandskurve vil gå fra et avvik med positivt til negativt fortegn. Gjennomsnittet for dette vil bli kunstig lavt. Jeg har derfor beregnet standardavviket som tallfester hvor mye avviket for et fartøy varierer mot gjennomsnittet. Et fartøy med lavt middelavvik, men høyt standardavvik avslører det nevnte scenarioet. Det totale middelavviket samt standardavviket for hver metode er vist i Tabell 5.2, avviket for hvert fartøy er vist i Tillegg E. I Figur 5.1 er alle avvikene plottet mot alle testede hastigheter, for å få oversikt over om det er noen tendenser knyttet til Froude tall. Det er viktig å påpeke at for de fartøyene som metodene ANN og Holtrop ikke kunne beregne motstanden for, er vist som null avvik i figurene, men er tatt ut av beregningene for avvik.

$$X = 100 \cdot \frac{x_{beregnet} - x_{modell}}{x_{modell}} \quad (5.1)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (5.2)$$

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (5.3)$$

Det er ikke sikkert et avvik for hele hastighetsområdet er like relevant for alle fartøy. Av den grunn har jeg beregnet resultatene også for tre Froude tall intervaller ($F_N \leq 0.2$, $0.2 < F_N \leq 0.3$, $0.3 < F_N$). Middelavvik og Standardavvik for hele datamaterialet er gitt i Tabell 5.3 for hver metode innenfor disse intervallene, mens avviket for hvert fartøy er lagt ved i tillegg E.

Tabell 5.3: Tre froude-tall intervaller er valgt, og middelavviket til totalmotstanden til hver metode er regnet ut i hvert intervall for alle lastekondisjoner. Tabellen viser gjennomsnittet og standardavvikene for de prosentvise avvikene for alle lastekondisjoner knyttet til de tre intervallene. Negativt middelavvik indikerer underprediksjon av mostand. Beregningene er basert på tabellene E.3 - E.8

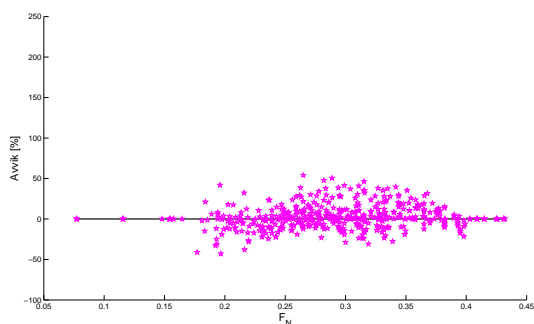
| Metode | Middelavvik | Standardavvik |
|----------------------|-------------|---------------|
| $F_N \leq 0.2$ | | |
| ANN | -3.6158 | 3.5067 |
| Digernes | 11.7171 | 16.8378 |
| Hollenbach | -10.1767 | 5.1245 |
| Holtrop | -1.1343 | 4.0854 |
| Oortmerssen | 8.3633 | 4.9392 |
| $0.2 < F_N \leq 0.3$ | | |
| ANN | 2.8709 | 4.4254 |
| Digernes | 12.1420 | 3.7817 |
| Hollenbach | -14.8323 | 4.4450 |
| Holtrop | 3.0308 | 5.0440 |
| Oortmerssen | 36.7626 | 13.6133 |
| $0.3 \leq F_N$ | | |
| ANN | 3.0862 | 4.6070 |
| Digernes | 7.4723 | 3.7817 |
| Hollenbach | -5.0515 | 9.9283 |
| Holtrop | 4.0503 | 5.5963 |
| Oortmerssen | 40.6164 | 15.8903 |

5.2 Trender

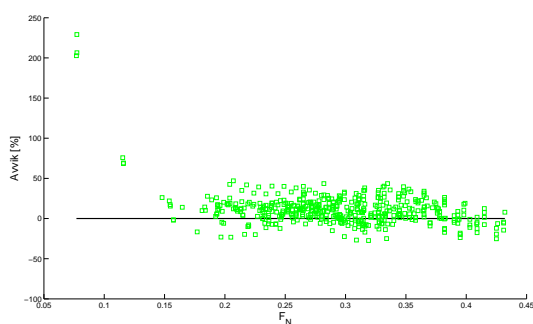
En trend er en forutsigbar forandring over en eller flere parametere. Den kan identifiseres gjennom statistikk (kovarians, determinantkoeffisient el.), men da trenger man en hypotese å teste mot. Jeg har ikke hatt noen utgangshypotese, eller utarbeidet en underveis i arbeidet. Jeg har istedenfor valgt å vise trender gjennom matematikk, samt å vise trender (eller mangler på sådan) grafisk. Som en videreføring av arbeidet med å regne avviket i utvalgte Froudetall intervaller, viser Figur 5.1 alle beregnede avvik for alle fartøy mot Froudetall.

Det er ikke bare Froudetall som er interessant å sjekke for eventuelle trender. Skrogparametere kan også gi en god pekepin på om det er enkelte skip som kan forventes å predikteres bedre enn andre. Jeg har valgt å teste avvikene mot mange av de skrogparametere jeg har hatt tilgang til for datamaterialet. Jeg har tatt utgangspunkt i middelavviket for hvert fartøy, da dette bør gjenspeile det generelle avviket. Men siden de aller fleste skip prosjekteres med hensyn til en bestemt designhastighet, er det også veldig relevant å se hvordan metodene treffer for disse hastighetene. Basert på antatt praksis er designhastigheten estimert som den nest høyeste hastigheten som et modelltestet. Avvikene over vannlinjelengden, prismatisk koeffisient og kronologisk løpenummer er vist i Figur 5.2 og 5.3. I tillegg er avvikene over L/B , B/T , designtrim, blokk-koeffisient og deplasement lagt ved i Tillegg D. Jeg har ikke vært i stand til å finne noen trend i disse plottene, og har dermed ikke gått dypere inn i materialet for å få frem en trend.

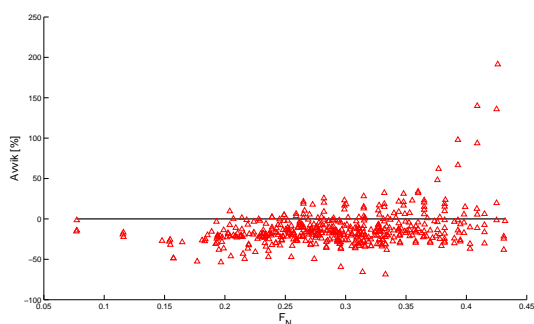
«Om ein torturerer dataene sine lenge nok, vil dei tilstå»
(Prof. Ingelin Steinsland, 2012)



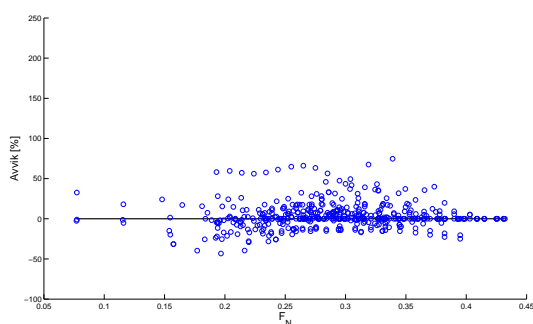
(a) ANN metode



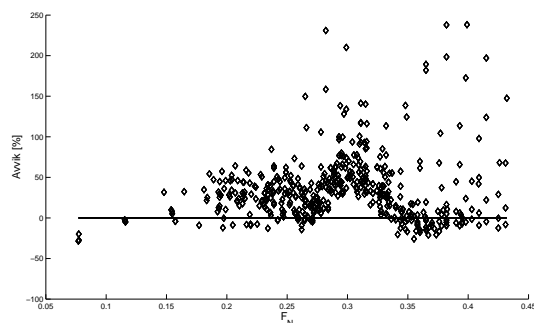
(b) Digernes' formel



(c) Hollenbach

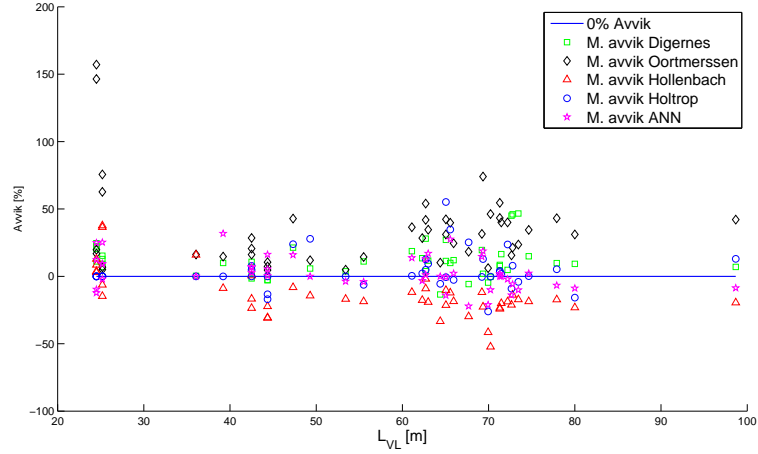


(d) Holtrop

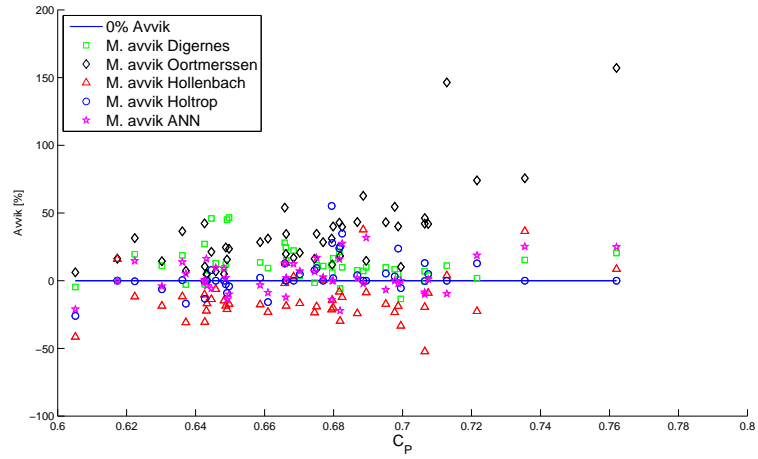


(e) Oortmerssen

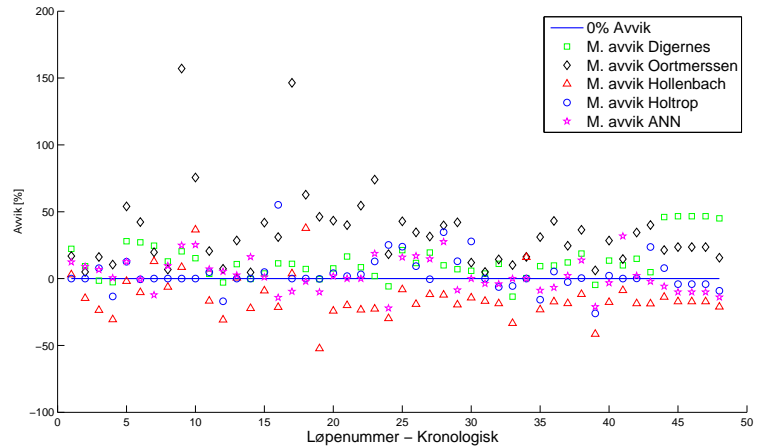
Figur 5.1: Prosentvis avvik av totalmotstand mot modellforsøk er beregnet for alle lastekondisjoner og hastigheter. Resultatene for hver metode er plottet mot Froudetall. Null avvik er merket med sort linje og y-aksen går fra -100% til 250% avvik. ANN og Holtrop kunne ikke beregne motstanden for alle hastigheter og lastekondisjoner, disse vises som 0% avvik, men er ikke tatt med i beregningene av middel- og standardavvik.



(a) Middellavvik mot vannlinjelengde

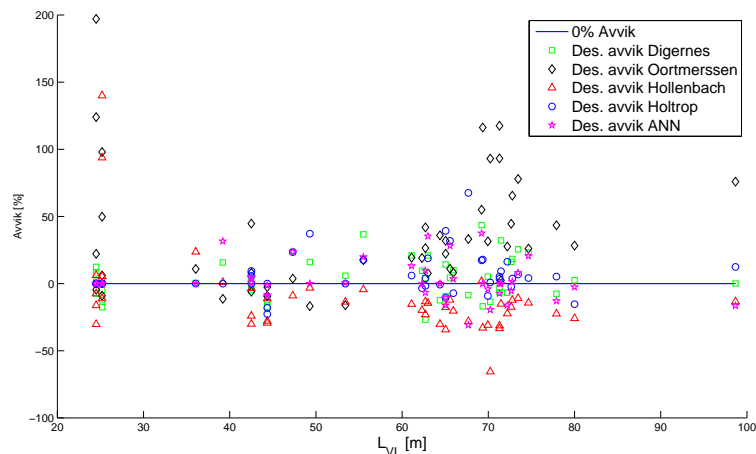


(b) Middellavvik mot prismatisk koeffisient

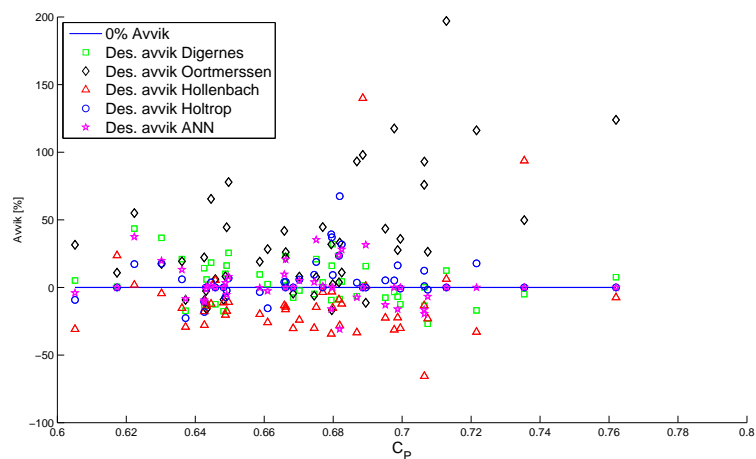


(c) Middellavvik over løpenummer i kronologisk rekkefølge

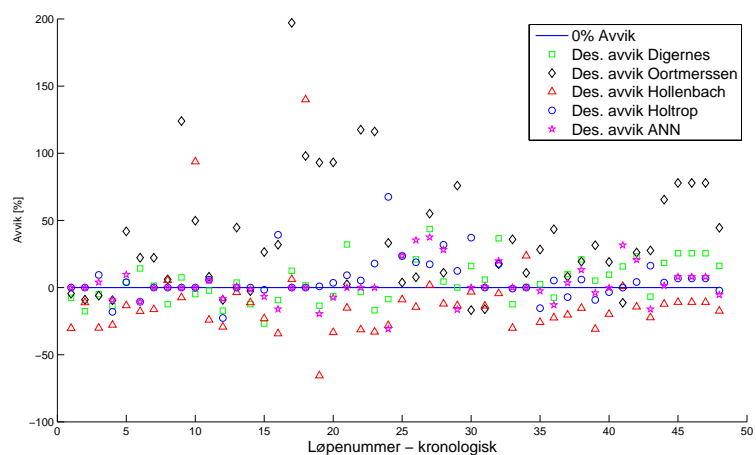
Figur 5.2: Prosentvis middellavvik av totalmotstand mot modellforsøk er plottet for hver lastekondisjon og metode mot tre utvalgte parametre. Null avvik er markert med en horisontal linje. For de lastekondisjonene ANN eller Holtrop ikke kunne beregne, er avviket vist som 0%. Datene er basert på Tabell E.1 og E.2. Plot mot flere parametre er vist i Tillegg D



(a) Avvik ved antatt designhastighet mot vanlinjelengde



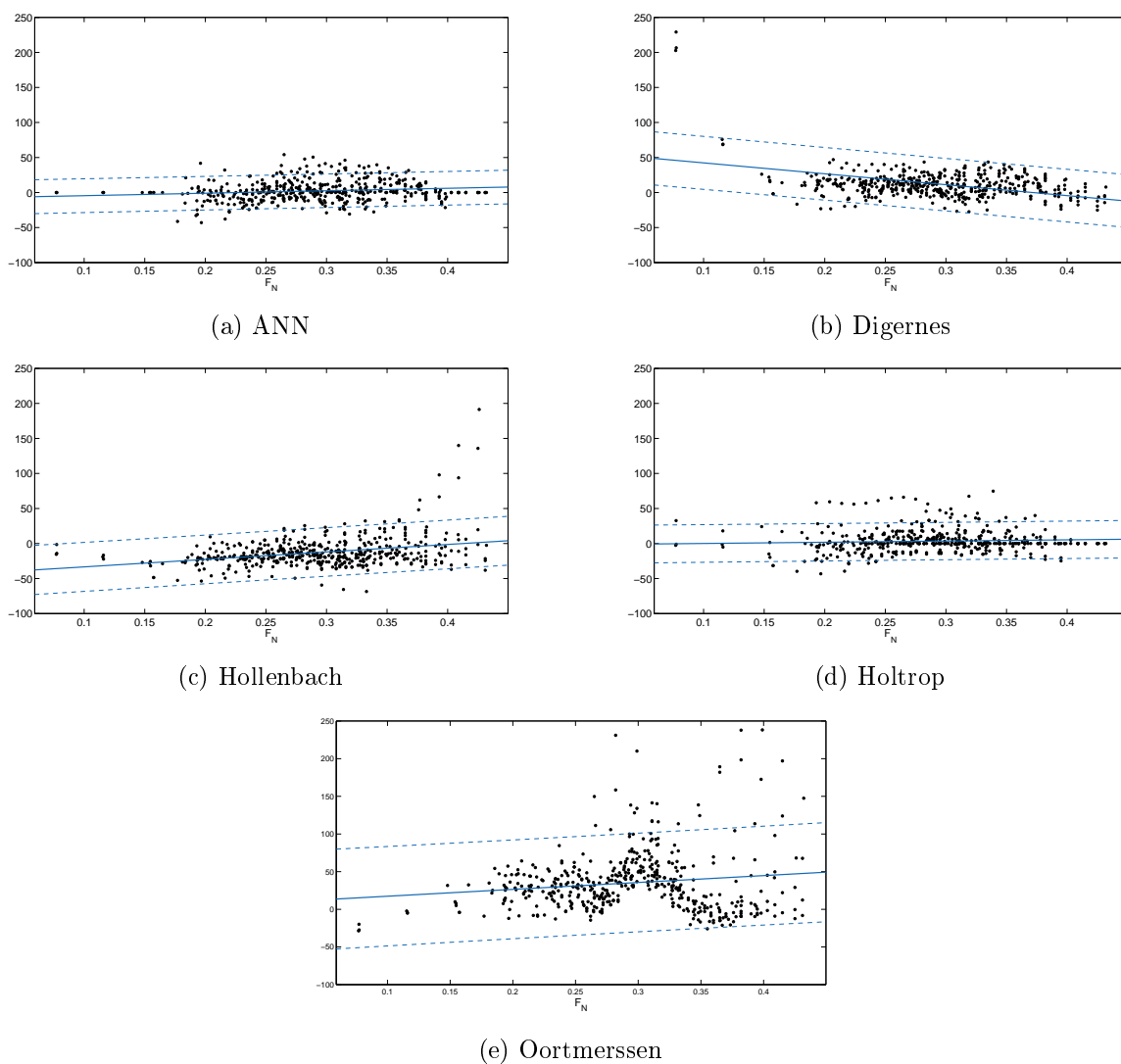
(b) Avvik ved antatt designhastighet mot prismatisk koeffisient



(c) Avvik ved antatt designhastighet mot løpenummer i kronologisk rekkefølge

Figur 5.3: Prosentvis avvik av totalmotstanden mot modellforsøk ved antatt designhastighet (se Avsnitt 5.2) er plottet for hver lastekondisjon og metode mot tre utvalgte parametere. Null avvik er markert med en horisontal linje. For de lastekondisjonene ANN eller Holtrop ikke kunne beregne, er avviket vist som 0%. Plot mot flere parametere er vist i Tillegg D

En siste fremstilling jeg har benyttet er å vise avviket over Froude tall med et 90% konfidensintervall. Siden det ikke er noen klar trend, har jeg gjort det enkelt og brukt en linær interpolasjon for dataene. Disse plottene er laget i Matlab-tillegget «Curve Fitting tool», beregningene er automatisk generert og nullverdiene for hastighetene der ANN og Hollenbach metodene ikke kunne beregne motstanden er med i beregningen av konfidensintervallet. Konfidensintervallet for Digernes blir også tydelig påvirket av noen få store avvik ved lave hastigheter. Resultatene som er vist i Figur 5.4 bør derfor tas med en «klype salt». Det kan allikevel gi en indikator på hvor godt samlet resultatene er for de ulike metodene.



Figur 5.4: Prosentvis avvik av totalmotstanden mot modellforsøk for alle lastekondisjoner og hastigheter er plottet som i Figur 5.1. Datene er behandlet i Matlab-tillegget «curve-fit tool» for å vise et 90% konfidensintervall basert på en linær interpolasjon.

Kapittel 6

Konklusjon

Det er ikke enkelt å trekke en entydig konklusjon ut fra de presenterte resultatene, det er mange avvik som er vanskelig å forutse. Alikevel virker det klart at ANN og Holtrop kommer best ut av det beregnede middel- og standardavviket. Disse to metodene er også de eneste som ikke har blitt kjørt for fartøy utenfor sine respektive gyldighetsområder fordi ShipX ikke tillater dette. Det at B/L -forholdet i stor grad var for lavt for Holtrop, samt oppdriftssenter for langt bak for ANN, hindret disse metodene i å bli beregnet i ShipX. Dette er ikke en kritikk mot disse metodene, men kan ha gitt en fordel relativt sett mot de andre metodene som har blitt kjørt for alle fartøy uavhengig av gyldighetsområde. Det må derfor vurderes om fartøyene man ønsker å beregne ligger innenfor gyldighetsområdet til disse metodene og om man ser etter en all-round metode.

Digernes metode viste seg å være en god allround metode, men predikterer jevnt over litt for høy motstand. Man skal også være forsiktig med å benytte metoden for svært lave hastigheter, det er her de største avvikene til denne metoden avdekkes. En av styrkene til Digernes metode er at motstanden i stor grad følger motstandskurven til modellforsøkene, den gir dermed et godt bilde på oppførselen til motstandskurven.

Hollenbach kommer svakt ut i dette arbeidet. Den underpredikterer motstanden, og gir jevnt over høye verdier for både middel- og standardavvik. Basert på disse resultatene kan ikke Hollenbach anbefales brukt på fiskefartøy.

Oortmerssen har en merkelig oppførsel på enkelte av motstandskurvene, og gir store avvik. En nærliggende forklaring er at det er gjort feil i Matlabskriptet som årsak til disse merkelige resultatene. Jeg har brukt mye tid på kvalitetssikre dette skriptet, men slik resultatene fremstår er det ikke brukbart. Metoden gir også veldig store avvik for høye prismatiske koeffisienter og lave L/B -forhold.

Jeg kan anbefale ANN og Holtrop så lenge fartøyene ligger innenfor gyldighetsområdet til metodene, utenfor dette er Digernes et godt alternativ.

Kapittel 7

Videre arbeid

Under dette arbeidet har det slått meg hvor ustabile de empiriske metodene fremstår over et relativt smalt utvalg fartøy. Dette kan ha flere årsaker, det er spesielt to ting jeg mener kan gi en bedre forutsigbarhet:

- **Bedre brukervennlighet** Det er ikke alltid like lett å få oversikt hvordan de ulike parameterne er definert, noe jeg mener er en forutsetning for å benytte metodene optimalt. Dette blir tydelig illustrert i Figur 3.4
- **Bedre forståelse** Det er ikke alltid like lett å forutse hvordan de avanserte metodene oppfører seg. Det ville derfor være nyttig med en dybdestudie for de enkelte metodene for å undersøke oppførselen over et utvalg parametere

ANN metoden som er benyttet her er utviklet av MARINTEK og basert på deres slepeforsøk. Siden ANN metoder blir bedre med større datagrunnlag, vil det være interessant å se om de allerede gode resultatene kan bli enda bedre. ANN åpner også for mulighetene til å skreddersy metoder til spesielle datagrunnlag.

Et eventuelt videre arbeid med disse empiriske metoden må veies opp mot nytteeffekten. I disse dager gjøres det store fremskritt innenfor CFD slik at dette verktøyet på sikt kan komme til å ta helt over for empiriske metoder. Det vil derfor være mer fremtidsrettet å se på hvilket potensialet CFD har til å overta for empiriske metoder. Dette kan gjøre på flere måter:

- **Nøyaktighet** Nøyaktigheten til en CFD analyse er ofte et kompromiss mot ressursbruk. Det kan derfor være fornuftig å se på sammenhengen mellom oppløsningen på modellen opp mot avviket til modellforsøk
- **Parameterforsøk** CFD metoder gir en unik mulighet til å teste effekten av parameterendringer med utgangspunkt i ett typisk skrog

Bibliografi

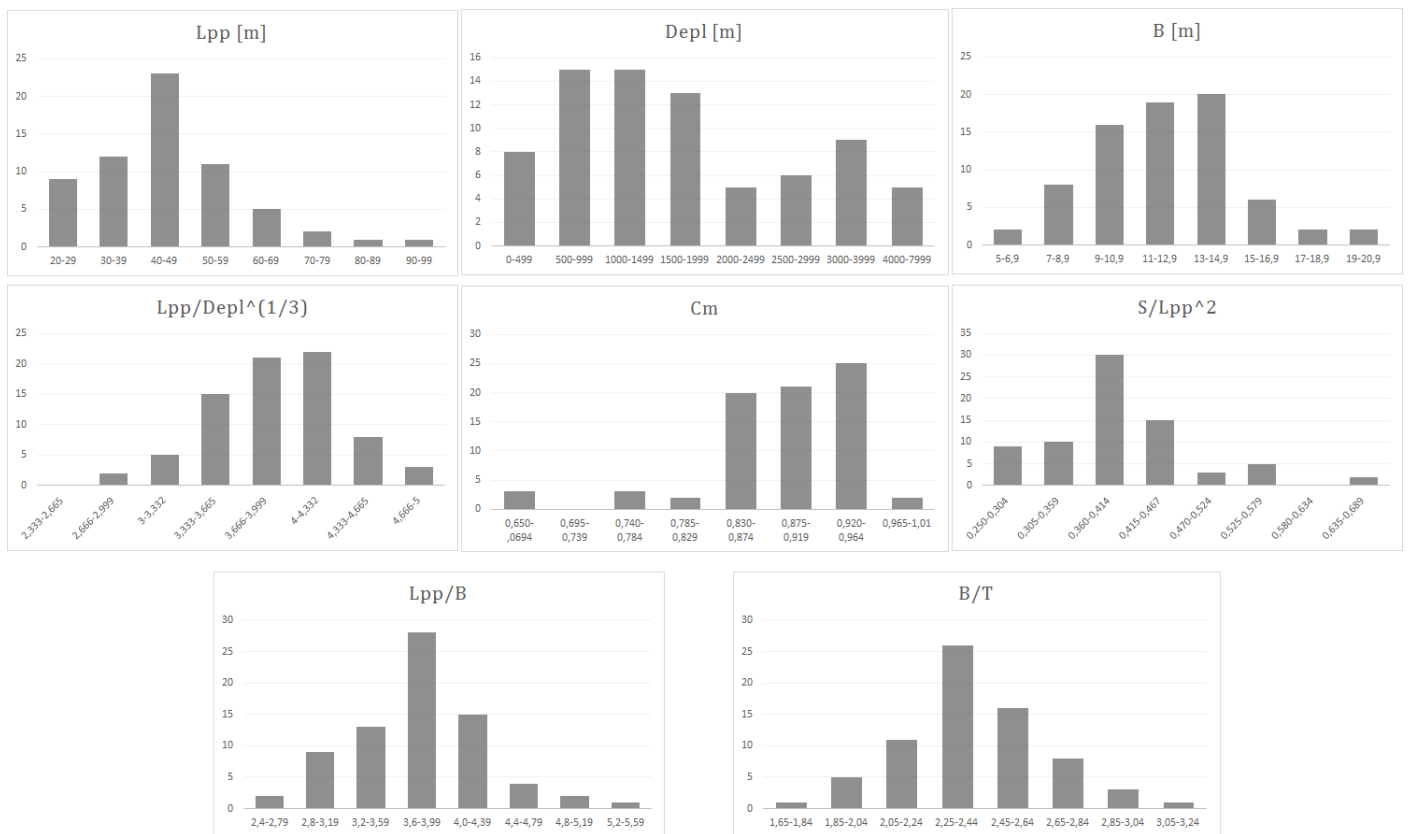
- Croonenborghs, E. s., Sileo, L., and Östman, A. (Mai 2012). Optimisation of hull lines. *MARINTEK Review*, pages 2–3.
- Digernes, T. (1982). *An analytical approach to evaluating fishing vessel design and operation*. PhD thesis, Norwegian Institute of Technology.
- Digernes, T. (1983). Motstand, fremdrifts og styring. Technical Report 2, Fiskeriteknisk Forskingsinstitutt (FTFI). Resistance regressions - results using norwegian danish and FAO - material.
- Fathi, D., Ringen, E., Alterskjær, A., and Berget, K. (2012). *ShipX Ship Speed & Powering Manual*. MARINTEK.
- Granville, P. (1956). The viscous resistance of surface vessels and the skin friction of flat plates. *Trans. SNAME*, 64:209–227.
- Hollenbach, K. U. (1998). Estimating resistance and propulsion for single-screw and twin-screw ships-ship technology research 45 (1998). *Schiffstechnik*, 45(2):72.
- Holtrop, J. (1977). Statistical analysis of performance test results. *International Shipbuilding Progress*, 24(270).
- Holtrop, J. (1984). A statistical re-analysis of resistance and propulsion data. *International Shipbuilding Progress*, 31(363):272–276.
- ITTC (2011). Ittc – recommended procedures and guidelines: Resistance test. Technical report, ITTC.
- Jullumstrø, E. and Frostad, R. (1989). Årsrapport 1988. Technical Report 510337 Del 1, MARINTEK. Moderne Skrogformer for Fiskefartøyer.
- Leine, K. (1986). Utprøving av utvalgte formler for beregning av motstand i stille vann. Technical report, Fiskeriteknologisk forskningsinstitutt. Basert på diplomoppgaven til Kjetil Leine, utgitt som rapport gjennom FtFi av Hans Peder Pedersen.
- Raven, H., Van der Ploeg, A., Starke, A., and Eça, L. Towards a cfd-based prediction of ship performance—progress in predicting full-scale resistance and scale effects. http://www.marin.nl/upload_mm/d/7/f/1971927788_1999999460_2008-RINA-MarineCFD-RavenPloegStarkeEca.pdf.

Steen, S. (2013). *Ship Resistance - Lecture notes TMR4220*. Dep. Marine Technology, NTNU.

Van Oortmerssen, G. (1971). A power prediction method and its application to small ships. *International Shipbuilding Progress*, 12(207).

Tillegg A

ANN Grunnlag



Figur A.1: Grafisk fremstilling av fartløy-grunnlaget for MARINTEKs ANN-metode.
Søylediagrammene viser antall fartøy mot utvalgte parameter

Tillegg B

Digernes.m


```

function[R] = Digernes(Lwl, B, T, DeplV, Fn)

%% ----- Input Variable -----
%   Lwl          Vannlinjelengde          [m]
%   B            Bredde                   [m]
%   T            Dypgang                   [m]
%   DeplV        Deplasement volum        [m^3]
%   Fn           Froude tall

%% ----- Variabler -----

n   = length(Fn);           % Antall hastigheter
V   = zeros(1,n);           % Hastighetsvektor
R   = zeros(1,n);           % Motstandsvektor

%% ----- Konstanter -----
a   = 2.956*10^(-4);
b   = 0.802;
c   = 0.745;
delta = 1.113;
beta  = 15.605;

g   = 9.80665;               % Tyngdens akselerasjon
%% ----- Hastighet -----

for i = 1:n
    V(i) = Fn(i)*sqrt(g*Lwl); % Konvertere fra Fn til m/s
end

%% ----- Results -----

for i = 1:n
    R(i) = (a*(Lwl/B)^(b)*(B/T)^(c)*DeplV^(delta)*exp(beta*Fn(i)))/V(i);
    % Motstand i kN
end

```

Tillegg C

Oortmerssen_71.m

```

function[Rt] = Oortmerssen_71(Lpp, Lwl, B, T, Cm, Cp, Cb, DispV, S, iE, FB, D, Fn)

%% ----- Input Variabler -----
%   Lpp      Lengde mellom perpedikulaer      [m]
%   Lwl      Lengde over vannlinhe            [m]
%   B        Bredde paa spant                 [m]
%   T        Dypgang                          [m]
%   Cm       Midtspantkoeffisient             [-]
%   Cp       Prismatisk koeffisient           [-]
%   Cb       Blokk-koeffisient               [-]
%   DispV    Volumdeplasement                [m^3]
%   S        Vaat overflate paa skrog         [m^2]
%   iE       Halve innlopsvinkelen i baugen   [grader]
%   FB       Langskips plassering av
%           oppdriftssenter fra FP            [m]
%   D        Propelldiameter                  [m]
%   Fn       Froudetall                       [m]      - Kan vaere vektor

%% ----- Variabler -----
Ld = (Lpp + Lwl)/2;           % Deplasementlengde
lcb = 100*(0.5*Ld-FB)/Ld;     % Oppdriftssenterets plassering i prosent av Ld
Cwl = iE*(Ld/B);             % Innlopsvinkel-koeffisient
m = 0.14347*Cp^(-2.1976);    % Oppgitt variabel
DispW = 1025*DispV;          % Endrer fra volumdeplasement til kg
D6 = 139;                    % Formfaktorkoeffisient
n = length(Fn);              % Antall hastigheter
V = zeros(1,n);              % Hastighetsvektor
Fn2 = zeros(1,n);            % Froudetall^(-2)-vektor
Rn = zeros(1,n);             % Reynoldsnummer vektor
Rt = zeros(1,n);             % Motstandsvektor
Pe = zeros(1,n);             % Slepeeffekt vektor
t = zeros(1,n);              % Thrustdeduksjon
wt = zeros(1,n);             % Wake fraction
nR = zeros(1,n);             % Relativ rotasjonseffekt

%% ----- Konstanter -----
% Koeffisienter bruk for beregning av motstand
d0 = [79.32134, 6714.88397, -908.44371, 3012.14549];
d1 = [-0.09287, 19.83, 2.52704, 2.71437];
d2 = [-0.00209, 2.66997, -0.35794, 0.25521];
d3 = [-246.45896, -19662.024, 755.1866, -9198.8084];
d4 = [187.13664, 14099.904, -48.93952, 6886.60416];
d5 = [-1.42893, 137.33613, -9.86873, -159.92694];
d6 = [0.11898, -13.36938, -0.77652, 16.23621];
d7 = [0.15727, -4.49852, 3.7902, -0.82014];
d8 = [-0.00064, 0.021, -0.01879, 0.00225];
d9 = [-2.52862, 216.44923, -9.24399, 236.3797];
d10 = [0.50619, -35.07602, 1.28571, -44.1782];
d11 = [1.62851, -128.72535, 250.6491, 207.2558];

% Koeffisienter brukt for beregning av propulsjon
e0 = [-0.9329, 0.72681, 0.03814];
e1 = [3.94349, -1.74379, 3.69241];

```

```

e2 = [-2.98757, 1.37241, -2.86243];
e3 = [-0.98059, 0.26229, -0.33299];
e4 = [1.0486, -0.22019, -0.70954];
e5 = [0.0049, 0.01379, -0.00204];
e6 = [0.00228, -0.00786, -0.00336];
e7 = [-0.00152, 0.00216, -0.0035];

c6 = 0; % (D6*Cb^2)/((Ld/B)^2*((B/T)^2 + 1)); % Formfaktor (ikke benyttet)

c = zeros(1,4);
g = 9.80665; % Gravitasjonskonstant
v = 1.15E6; % Kinetisk viskositet - vann
rho = 1025; % Massetetthet - saltvann
%% ----- Koeffisienter -----

for i = 1:n % Definere variabler
    V(i) = Fn(i)*sqrt(g*Ld);
    Rn(i) = (Ld*V(i))/v;
    Fn2(i) = Fn(i)^(-2);
end

for i = 1:4 % Basert aa formel gitt av Oortmerssen
    c(i) = ( d0(i) ...
        + d1(i)*lcb + d2(i)*lcb^2 ...
        + d3(i)*Cp + d4(i)*Cp^2 ...
        + d5(i)*(Ld/B) + d6(i)*(Ld/B)^2 ...
        + d7(i)*Cwl + d8(i)*Cwl^2 ...
        + d9(i)*(B/T) + d10(i)*(B/T)^2 ...
        + d11(i)*Cm ) /1000;
% disp(c(i)*1000)
end

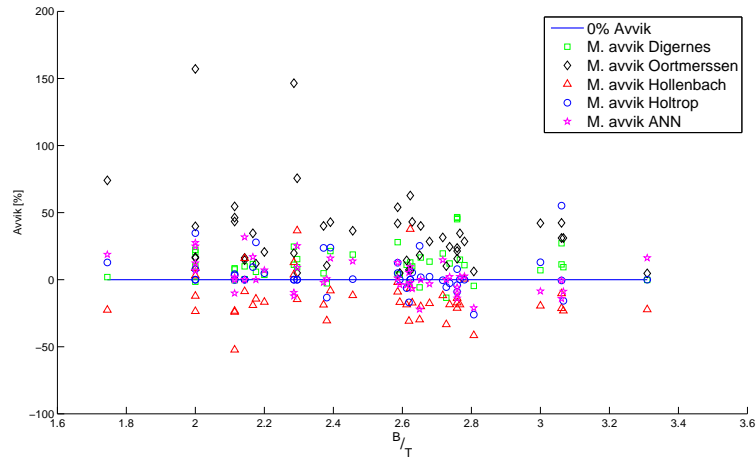
%% ----- Resultater -----

for i = 1:n % Beregning av mostand og Propulsjon
    Rt(i) = ( ( c(1)*exp(-(m/9)*Fn2(i)) + c(2)*exp(-m*Fn2(i)) ...
        + c(3)*exp(-m*Fn2(i))*sin(Fn2(i)) ...
        + c(4)*exp(-m*Fn2(i))*cos(Fn2(i)) ) * DispW * g ...
        + ((1 + c6)*((0.075/((log10(Rn(i)) - 2)^2))+0.00043)*(0.5*rho*V(i)^(2)*S)) );
    Pe(i) = Rt(i)*V(i);
    t(i) = e0(1) + e1(1)*Cp + e2(1)*Cp^2 + e3(1)*Cp*Fn(i) + e4(1)*Cp*Fn(i)^2 ...
        + e5(1)*Cp*lcb + e6(1)*(Ld/B) + e7(1)*(Ld/D);
    wt(i) = e0(2) + e1(2)*Cp + e2(2)*Cp^2 + e3(2)*Cp*Fn(i) + e4(2)*Cp*Fn(i)^2 ...
        + e5(2)*Cp*lcb + e6(2)*(Ld/B) + e7(2)*(Ld/D);
    nR(i) = e0(3) + e1(3)*Cp + e2(3)*Cp^2 + e3(3)*Cp*Fn(i) + e4(3)*Cp*Fn(i)^2 ...
        + e5(3)*Cp*lcb + e6(3)*(Ld/B) + e7(3)*(Ld/D);
end

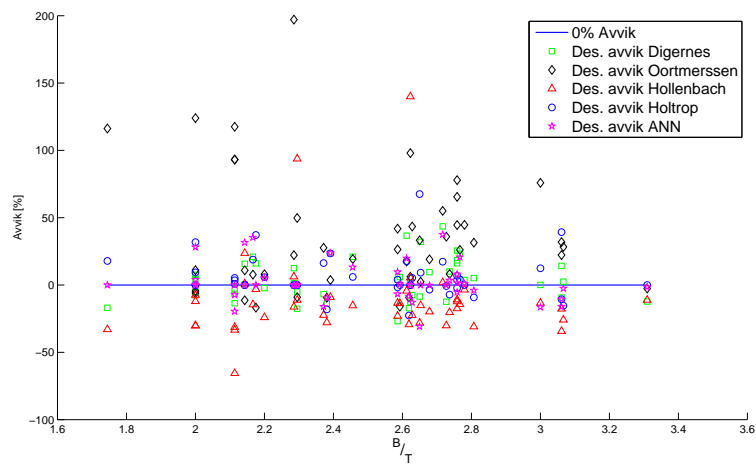
```

Tillegg D

Avvikstrender



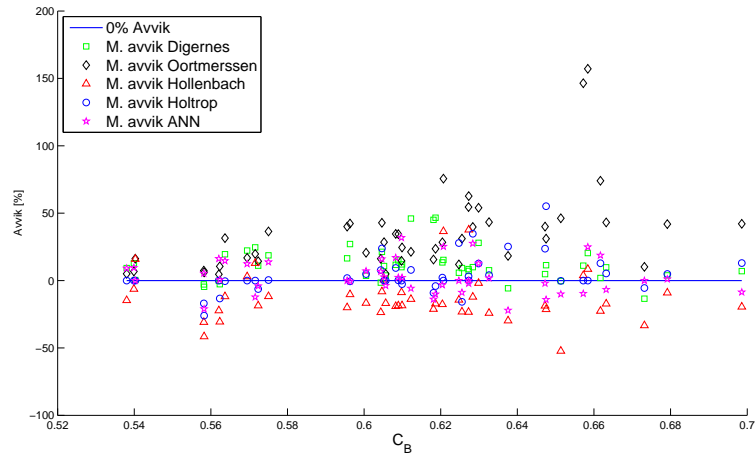
(a) Middelavvik



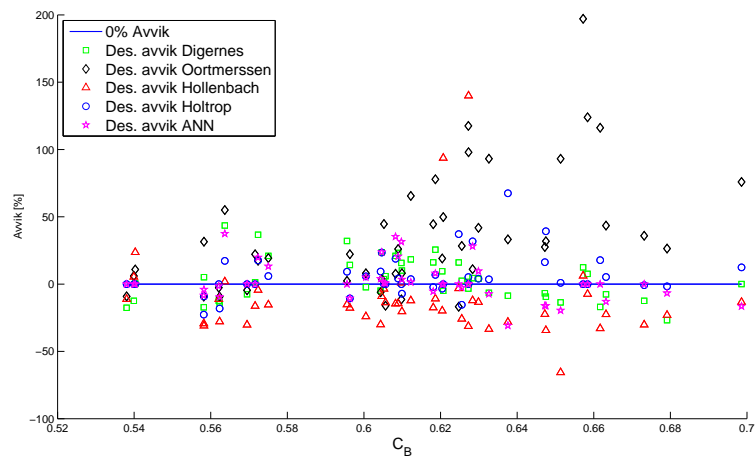
(b) Avvik ved antatt designhastighet

Figur D.1: Prosentvis avvik av totalmotstanden mot modellforsøk er plottet mot B/T forholdet

til alle lastekondisjoner i materialet. Resultatene for både antatt designhastighet og middelavvik er plottet for alle metodene. Null avvik er markert med en horisontal linje. For de lastekondisjonene ANN eller Holtrop ikke kunne beregne, er avviket vist som 0%

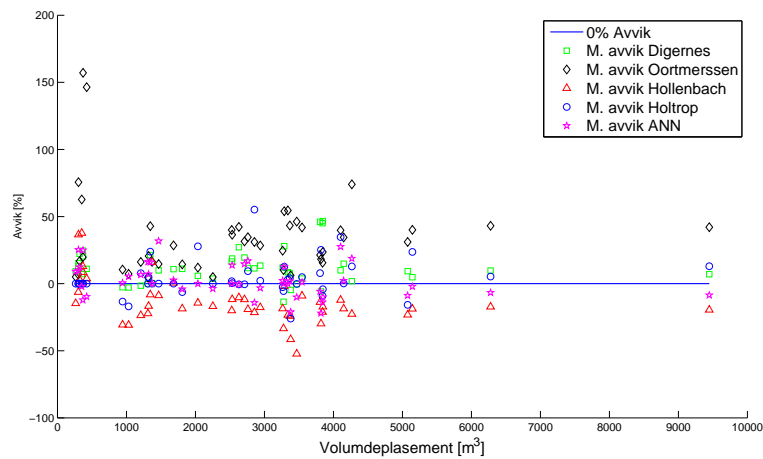


(a) Middelavvik

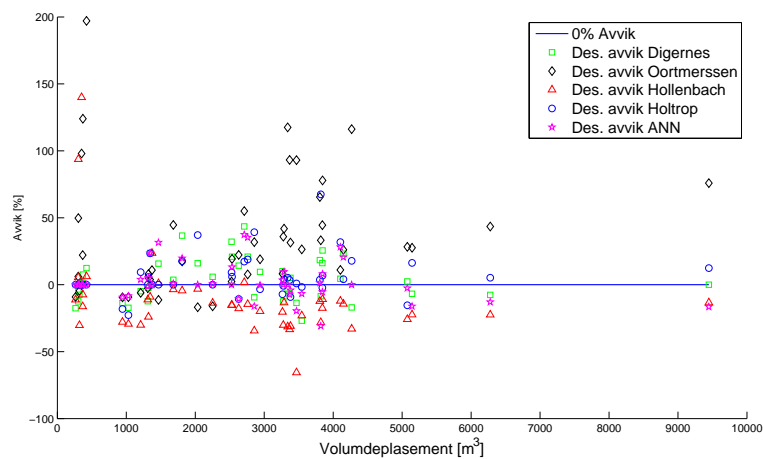


(b) Avvik ved antatt designhastighet

Figur D.2: Prosentvis avvik av totalmotstanden mot modellforsøk er plottet mot blokk-koeffisienten til alle lastekondisjoner i materialet. Resultatene for både antatt designhastighet og middelavvik er plottet for alle metodene. Null avvik er markert med en horisontal linje. For de lastekondisjonene ANN eller Holtrop ikke kunne beregne, er avviket vist som 0%

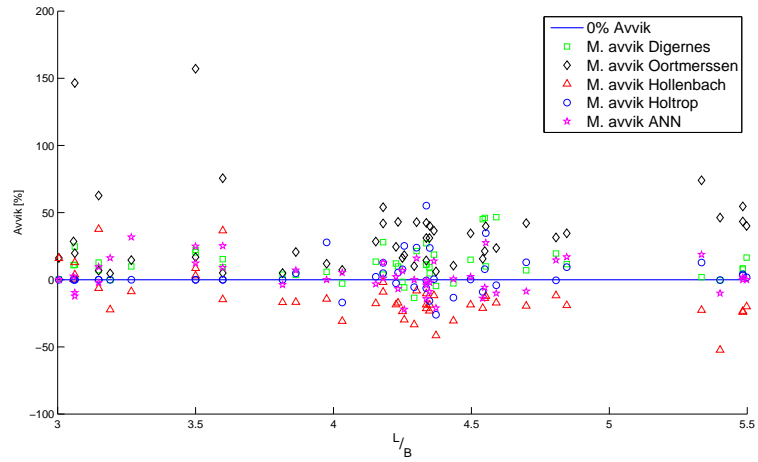


(a) Middelavvik

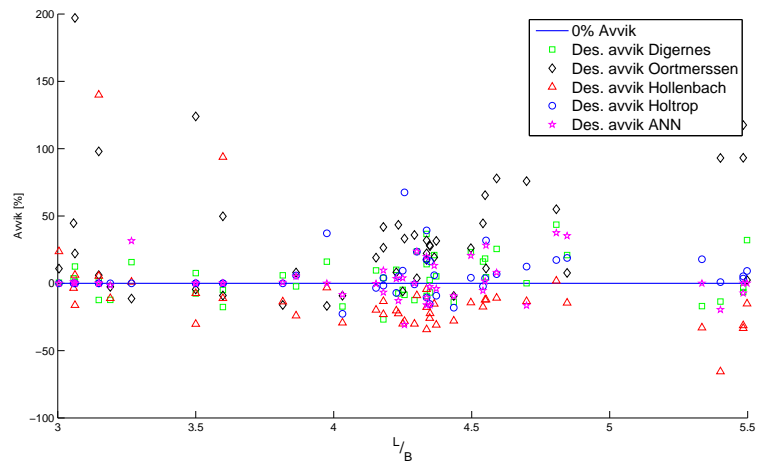


(b) Avvik ved antatt designhastighet

Figur D.3: Prosentvis avvik av totalmotstanden mot modellforsøk er plottet mot volumdeplasementet til alle lastekondisjoner i materialet. Resultatene for både antatt designhastighet og middelavvik er plottet for alle metodene. Null avvik er markert med en horisontal linje. For de lastekondisjonene ANN eller Holtrop ikke kunne beregne, er avviket vist som 0%



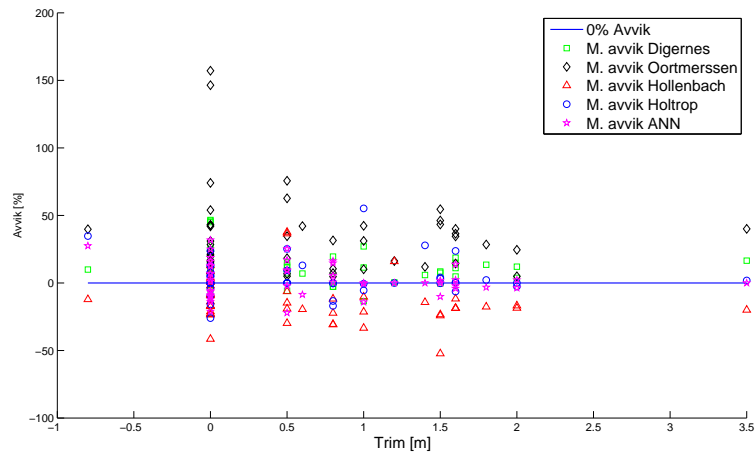
(a) Middelavvik



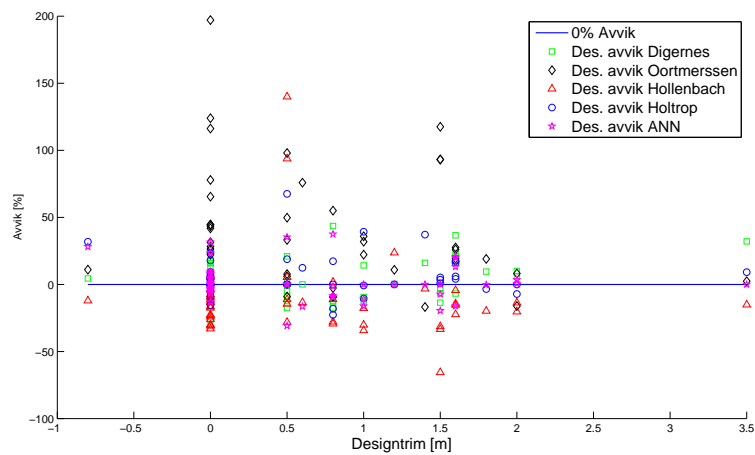
(b) Avvik ved antatt designhastighet

Figur D.4: Prosentvis avvik mot av totalmotstanden modellforsøk er plottet mot L/B forholdet

til alle lastekondisjoner i materialet. Resultatene for både antatt designhastighet og middelavvik er plottet for alle metodene. Null avvik er markert med en horisontal linje. For de lastekondisjonene ANN eller Holtrop ikke kunne beregne, er avviket vist som 0%



(a) Middelavvik



(b) Avvik ved antatt designhastighet

Figur D.5: Prosentvis avvik av totalmotstanden mot modellforsøk er plottet mot designtrim i meter for alle lastekondisjoner i materialet. Resultatene for både antatt designhastighet og middelavvik er plottet for alle metodene. Null avvik er markert med en horisontal linje. For de lastekondisjonene ANN eller Holtrop ikke kunne beregne, er avviket vist som 0%

Tillegg E

Middelavvik og Standard avvik for alle fartøy

Tabell E.1: Prosentvis middelavvik mot modellforsøk for alle lastekondisjoner er beregnet med alle metodene. Negativt avvik indikerer underprediktering av motstand. ANN og Holtrop kunne ikke beregne motstanden for alle fartøyene, dette er markert med «-»

| Nummer | ANN | Digernes | Hollenbach | Holtrop | Oortmerssen |
|--------|----------|----------|------------|----------|-------------|
| 1 | 12.3491 | 22.2732 | 2.9771 | - | 16.8235 |
| 2 | 9.0427 | 9.2376 | -14.6947 | - | 4.9901 |
| 3 | 6.6817 | -1.5259 | -23.5854 | 7.7527 | 16.1722 |
| 4 | 0.5105 | -2.6953 | -30.5883 | -13.3309 | 10.4872 |
| 5 | 12.6723 | 27.9480 | -1.9249 | 12.6237 | 53.9713 |
| 6 | -0.5633 | 27.0761 | -10.3086 | -0.5633 | 42.2706 |
| 7 | -12.2844 | 24.6189 | 12.9004 | - | 19.6920 |
| 8 | 9.4943 | 12.8189 | -6.3071 | - | 6.7765 |
| 9 | 24.9131 | 20.4093 | 8.5239 | - | 157.0911 |
| 10 | 25.2014 | 15.2837 | 36.5358 | - | 75.5873 |
| 11 | 7.0512 | 3.5318 | -16.6981 | 4.8009 | 20.6087 |
| 12 | 5.2616 | -2.8646 | -30.8393 | -16.9762 | 7.3015 |
| 13 | 2.5617 | 10.7979 | 0.5823 | - | 28.4557 |
| 14 | 16.2272 | -0.2313 | -22.2537 | - | 4.6793 |
| 15 | 1.0698 | 3.8325 | -9.0591 | 4.8704 | 41.8763 |
| 16 | -14.1638 | 11.3893 | -21.3627 | 55.1651 | 31.0707 |
| 17 | -9.6512 | 11.0584 | 3.7854 | - | 146.4305 |
| 18 | -2.1453 | 7.1357 | 37.7009 | - | 62.6843 |
| 19 | -10.1099 | -0.3829 | -52.2880 | -0.2267 | 46.2079 |
| 20 | 1.8228 | 7.5997 | -24.1453 | 4.0300 | 43.3295 |
| 21 | - | 16.4722 | -19.9962 | 1.7905 | 39.9947 |
| 22 | - | 8.4821 | -23.3718 | 3.1207 | 54.5710 |
| 23 | 18.7195 | 1.9110 | -22.6174 | 12.8182 | 74.0291 |
| 24 | -22.1016 | -5.7772 | -29.8001 | 25.1927 | 18.2443 |
| 25 | 15.9662 | 21.3002 | -8.1754 | 23.8373 | 42.8503 |
| 26 | 16.9368 | 11.6361 | -19.0790 | 9.3239 | 34.5701 |
| 27 | 14.6176 | 19.5087 | -11.7830 | -0.4556 | 31.4806 |
| 28 | 27.4904 | 9.9195 | -12.1800 | 34.7120 | 39.7678 |
| 29 | -8.6089 | 6.9861 | -19.5252 | 12.9833 | 42.0964 |
| 30 | - | 5.8363 | -14.3222 | 27.8155 | 11.9205 |
| 31 | -3.7360 | 3.7341 | -16.8196 | - | 4.9285 |
| 32 | -4.0723 | 11.0197 | -18.6247 | -6.3192 | 14.3476 |
| 33 | - | -13.4681 | -33.3737 | -5.5336 | 10.1503 |
| 34 | - | 0.3633 | 15.9510 | - | 16.1896 |
| 35 | -8.8382 | 9.2849 | -23.1928 | -15.7916 | 31.0512 |
| 36 | -6.7140 | 9.8133 | -17.2383 | 5.2832 | 43.0833 |
| 37 | 2.1569 | 12.0377 | -18.5403 | -2.6528 | 24.5037 |
| 38 | 13.7449 | 18.7049 | -11.7257 | 0.3461 | 36.4609 |
| 39 | -21.0934 | -4.6703 | -41.5174 | -26.0382 | 6.1077 |
| 40 | -3.2366 | 13.4578 | -17.6410 | 2.1766 | 28.4204 |
| 41 | 31.7529 | 9.9231 | -8.7593 | - | 14.6221 |
| 42 | 2.2425 | 14.8688 | -18.6259 | 0.1757 | 34.4784 |
| 43 | -2.1309 | 4.7599 | -18.7580 | 23.6716 | 40.0510 |
| 44 | -5.7866 | 46.0081 | -13.7826 | 7.8678 | 21.3302 |
| 45 | -10.1198 | 46.6111 | -17.1758 | -4.1268 | 23.5690 |
| 46 | -10.1198 | 46.6111 | -17.1758 | -4.1268 | 23.5690 |
| 47 | -10.1198 | 46.6111 | -17.1758 | -4.1268 | 23.5690 |
| 48 | -13.9417 | 45.0522 | -21.1486 | -9.1051 | 15.5828 |

Tabell E.2: Standardavvik av motstandsprediksjon for hver lastkondisjon er beregnet basert prosentvis avvik for alle metodene. ANN og Holtrop kunne ikke beregne motstanden for alle fartøyene, dette er markert med «-»

| Nummer | ANN | Digernes | Hollenbach | Holtrop | Oortmerssen |
|--------|---------|----------|------------|---------|-------------|
| 1 | 8.2986 | 19.4606 | 21.8364 | - | 31.8559 |
| 2 | 6.8530 | 17.9379 | 5.6749 | - | 25.3617 |
| 3 | 3.3290 | 6.6864 | 6.1149 | 1.2383 | 22.1923 |
| 4 | 6.7374 | 7.1904 | 3.9213 | 3.1205 | 19.2681 |
| 5 | 2.2341 | 15.4644 | 6.9178 | 5.1651 | 12.2428 |
| 6 | 5.7912 | 8.4684 | 8.4215 | 5.7912 | 14.5143 |
| 7 | 4.4619 | 15.3497 | 19.4583 | - | 23.3896 |
| 8 | 10.3388 | 17.5215 | 11.9823 | - | 20.8766 |
| 9 | 21.9088 | 10.4596 | 12.9642 | - | 47.4397 |
| 10 | 16.3393 | 13.5460 | 45.9193 | - | 31.9282 |
| 11 | 2.5713 | 5.7521 | 5.4458 | 2.0276 | 17.7702 |
| 12 | 9.4142 | 8.7301 | 3.0907 | 3.5356 | 16.2551 |
| 13 | 2.8911 | 5.1690 | 6.0700 | - | 19.7984 |
| 14 | 13.5768 | 8.1058 | 7.6970 | - | 14.6050 |
| 15 | 4.3022 | 19.2970 | 9.5903 | 6.2978 | 11.4960 |
| 16 | 2.1480 | 12.4244 | 9.4281 | 8.7487 | 7.0032 |
| 17 | 12.6806 | 11.1766 | 9.4370 | - | 60.1690 |
| 18 | 12.6769 | 10.0027 | 70.7277 | - | 31.8162 |
| 19 | 7.8003 | 9.3967 | 10.9757 | 7.5326 | 31.9077 |
| 20 | 7.2603 | 9.7882 | 6.8204 | 8.0042 | 28.1759 |
| 21 | - | 8.7218 | 2.7014 | 9.3100 | 51.3803 |
| 22 | - | 8.0921 | 5.8387 | 7.6303 | 35.3872 |
| 23 | 17.5431 | 15.7532 | 9.1258 | 11.8387 | 34.0455 |
| 24 | 6.5272 | 3.2513 | 4.7324 | 34.9247 | 16.2295 |
| 25 | 9.0523 | 3.3992 | 5.0905 | 9.0194 | 29.6690 |
| 26 | 16.9962 | 5.4271 | 3.5330 | 11.4936 | 34.6020 |
| 27 | 21.2587 | 18.9396 | 11.4196 | 16.9671 | 32.8798 |
| 28 | 8.0654 | 5.4756 | 4.4993 | 9.5370 | 32.7343 |
| 29 | 6.9068 | 8.5223 | 7.2247 | 6.3339 | 14.8064 |
| 30 | - | 8.6300 | 9.1693 | 12.2449 | 22.9389 |
| 31 | 5.8411 | 4.0754 | 5.2180 | - | 17.0534 |
| 32 | 19.1898 | 18.6977 | 12.2472 | 19.5070 | 27.3905 |
| 33 | - | 6.2504 | 7.5245 | 7.5055 | 17.4478 |
| 34 | - | 5.2494 | 8.0884 | - | 25.1805 |
| 35 | 3.3153 | 7.9753 | 4.3663 | 3.9093 | 8.1116 |
| 36 | 3.7371 | 11.6754 | 4.4953 | 3.5573 | 12.5591 |
| 37 | 2.3805 | 5.1709 | 3.7505 | 4.6339 | 16.9365 |
| 38 | 14.2544 | 12.7217 | 11.1258 | 14.6789 | 31.1309 |
| 39 | 18.0215 | 11.6707 | 10.1160 | 13.6039 | 17.7482 |
| 40 | 5.1190 | 3.4644 | 3.5023 | 4.6551 | 16.4166 |
| 41 | 15.4148 | 5.6597 | 10.2526 | - | 24.5594 |
| 42 | 14.0471 | 5.1178 | 2.8554 | 5.7546 | 22.7619 |
| 43 | 9.4246 | 7.2805 | 3.8871 | 5.9893 | 21.8381 |
| 44 | 11.2494 | 70.9203 | 7.6691 | 11.3520 | 26.5906 |
| 45 | 17.1154 | 62.0442 | 8.2199 | 11.5092 | 33.7307 |
| 46 | 17.1154 | 62.0442 | 8.2199 | 11.5092 | 33.7307 |
| 47 | 17.1154 | 62.0442 | 8.2199 | 11.5092 | 33.7307 |
| 48 | 11.4054 | 68.1329 | 6.6622 | 8.0729 | 26.6214 |

Tabell E.3: Prosentvis middelavvik mot modellforsøk for alle lastekondisjoner er beregnet med alle metodene for froude-tall lavere enn 0.2. Negativt avvik indikerer underprediktering av motstand.

Ikke alle modeller er modellkjørt på så lave hastigheter, manglende data er indikert med «-»

| Nummer | ANN | Digernes | Hollenbach | Holtrop | Oortmerssen |
|--------|----------|----------|------------|----------|-------------|
| 1 | - | - | - | - | - |
| 2 | - | - | - | - | - |
| 3 | - | - | - | - | - |
| 4 | - | - | - | - | - |
| 5 | - | - | - | - | - |
| 6 | - | - | - | - | - |
| 7 | - | - | - | - | - |
| 8 | - | - | - | - | - |
| 9 | - | - | - | - | - |
| 10 | - | - | - | - | - |
| 11 | - | - | - | - | - |
| 12 | - | - | - | - | - |
| 13 | - | - | - | - | - |
| 14 | - | - | - | - | - |
| 15 | 4.9078 | 21.7416 | -14.7822 | -1.7700 | 46.6009 |
| 16 | -11.7627 | 25.8794 | -3.3388 | 58.1446 | 32.0190 |
| 17 | - | - | - | - | - |
| 18 | - | - | - | - | - |
| 19 | 2.0853 | 11.7204 | -38.0499 | -5.4841 | 28.0225 |
| 20 | 6.1833 | 17.1005 | -20.5801 | -4.0066 | 25.4033 |
| 21 | - | 10.5458 | -22.1574 | -11.4489 | 14.8407 |
| 22 | - | 17.0663 | -20.0358 | -5.3246 | 29.6128 |
| 23 | 41.8108 | 16.2755 | -20.8387 | -1.7902 | 57.3447 |
| 24 | -12.6949 | -5.9492 | -36.4577 | -16.9957 | 10.4237 |
| 25 | - | - | - | - | - |
| 26 | - | - | - | - | - |
| 27 | -19.0886 | -4.5552 | -28.3684 | -25.3579 | -0.3326 |
| 28 | - | - | - | - | - |
| 29 | -1.3112 | 14.7473 | -26.2338 | 18.0834 | 33.7696 |
| 30 | - | - | - | - | - |
| 31 | - | - | - | - | - |
| 32 | - | - | - | - | - |
| 33 | - | - | - | - | - |
| 34 | - | - | - | - | - |
| 35 | -15.0281 | 14.3602 | -27.4831 | -25.6239 | 21.5149 |
| 36 | -1.1936 | 27.7734 | -20.0435 | 7.4533 | 54.3143 |
| 37 | - | - | - | - | - |
| 38 | - | - | - | - | - |
| 39 | -42.0713 | -10.8224 | -50.8642 | -36.5082 | -7.3415 |
| 40 | - | - | - | - | - |
| 41 | 21.1229 | 10.2426 | -25.0239 | - | 25.2060 |
| 42 | - | - | - | - | - |
| 43 | 8.1978 | 14.6454 | -22.6877 | 28.1894 | 44.8206 |
| 44 | -24.7697 | 80.0697 | -17.0183 | 11.8922 | -0.8312 |
| 45 | -32.8805 | 75.7868 | -23.3666 | -10.6464 | -3.3227 |
| 46 | -32.8805 | 75.7868 | -23.3666 | -10.6464 | -3.3227 |
| 47 | -32.8805 | 75.7868 | -23.3666 | -10.6464 | -3.3227 |
| 48 | -31.3049 | 74.2173 | -24.4189 | -11.9580 | -3.9831 |

Tabell E.4: Standardavvik beregnet for alle fartøy for Froude tall
lavere enn 0.2, sortert på metode.

Merk: Grunnen for de manglende verdiene er at ikke alle fartøy er testet for så lave hastigheter

| Nummer | ANN | Digernes | Hollenbach | Holtrop | Oortmerssen |
|--------|---------|----------|------------|---------|-------------|
| 1 | - | - | - | - | - |
| 2 | - | - | - | - | - |
| 3 | - | - | - | - | - |
| 4 | - | - | - | - | - |
| 5 | - | - | - | - | - |
| 6 | - | - | - | - | - |
| 7 | - | - | - | - | - |
| 8 | - | - | - | - | - |
| 9 | - | - | - | - | - |
| 10 | - | - | - | - | - |
| 11 | - | - | - | - | - |
| 12 | - | - | - | - | - |
| 13 | - | - | - | - | - |
| 14 | - | - | - | - | - |
| 15 | 1.7782 | 7.6701 | 5.2148 | 0.6234 | 16.3987 |
| 16 | 3.0371 | 6.6820 | 0.8621 | 15.0129 | 8.2673 |
| 17 | - | - | - | - | - |
| 18 | - | - | - | - | - |
| 19 | 0.5384 | 3.0262 | 9.8244 | 1.4160 | 7.2354 |
| 20 | 1.5965 | 4.4153 | 5.3138 | 1.0345 | 6.5591 |
| 21 | - | 2.7229 | 5.7210 | 2.9561 | 3.8318 |
| 22 | - | 4.4065 | 5.1732 | 1.3748 | 7.6460 |
| 23 | 10.7955 | 4.2023 | 5.3805 | 0.4622 | 14.8063 |
| 24 | 3.2778 | 1.5361 | 9.4133 | 4.3883 | 2.6914 |
| 25 | - | - | - | - | - |
| 26 | - | - | - | - | - |
| 27 | 4.9286 | 1.1762 | 7.3247 | 6.5474 | 0.0859 |
| 28 | - | - | - | - | - |
| 29 | 0.5501 | 7.6794 | 12.0650 | 8.4945 | 15.4878 |
| 30 | - | - | - | - | - |
| 31 | - | - | - | - | - |
| 32 | - | - | - | - | - |
| 33 | - | - | - | - | - |
| 34 | - | - | - | - | - |
| 35 | 3.8802 | 3.7078 | 7.0961 | 6.6161 | 5.5551 |
| 36 | 0.3082 | 7.1711 | 5.1752 | 1.9244 | 14.0239 |
| 37 | - | - | - | - | - |
| 38 | - | - | - | - | - |
| 39 | 14.8071 | 7.0297 | 23.3151 | 16.9310 | 3.8222 |
| 40 | - | - | - | - | - |
| 41 | 5.4539 | 2.6446 | 6.4611 | - | 6.5082 |
| 42 | - | - | - | - | - |
| 43 | 2.1167 | 3.7814 | 5.8579 | 7.2785 | 11.5726 |
| 44 | 6.3955 | 60.1497 | 9.3264 | 9.5071 | 6.7343 |
| 45 | 8.4897 | 54.2554 | 11.2171 | 6.9335 | 8.3155 |
| 46 | 8.4897 | 54.2554 | 11.2171 | 6.9335 | 8.3155 |
| 47 | 8.4897 | 54.2554 | 11.2171 | 6.9335 | 8.3155 |
| 48 | 8.0829 | 54.6501 | 11.7777 | 7.2946 | 8.0845 |

Tabell E.5: Middelavvik beregnet for alle fartøy for froude tall mellom 0.2 og 0.3

| Nummer | ANN | Digernes | Hollenbach | Holtrop | Oortmerssen |
|--------|----------|----------|------------|----------|-------------|
| 1 | 18.6310 | 38.8233 | 21.2257 | - | 46.8989 |
| 2 | 6.5415 | 16.1455 | -20.6478 | - | 13.6961 |
| 3 | 7.0573 | 4.3704 | -17.8207 | 7.6388 | 22.4478 |
| 4 | 5.1752 | -0.7993 | -31.7271 | -13.0637 | 9.3266 |
| 5 | 13.4558 | 36.8650 | 2.1013 | 15.0168 | 56.1461 |
| 6 | 2.2398 | 32.2113 | -6.5910 | 2.2398 | 43.7609 |
| 7 | -11.7611 | 30.3112 | 20.7964 | - | 36.0920 |
| 8 | 4.0668 | 17.1473 | -19.6496 | - | 11.8778 |
| 9 | 47.7286 | 23.8366 | 8.8400 | - | 196.9645 |
| 10 | 33.9310 | 22.7178 | -3.5758 | - | 102.6801 |
| 11 | 5.7884 | 8.9073 | -12.8060 | 2.3357 | 25.0637 |
| 12 | 12.3532 | 1.9450 | -30.9026 | -15.6924 | 9.3553 |
| 13 | 4.4712 | 14.5817 | -2.2368 | - | 30.1324 |
| 14 | 21.8202 | 1.9503 | -28.0586 | - | 5.9793 |
| 15 | 1.7050 | 6.4376 | -5.1634 | 7.7804 | 45.0538 |
| 16 | -14.1116 | 15.8621 | -19.6719 | 59.0007 | 31.0099 |
| 17 | -1.2462 | 15.4404 | -0.3174 | - | 115.0028 |
| 18 | -3.5272 | 15.4776 | -11.8497 | - | 47.7242 |
| 19 | -8.5661 | 2.4969 | -49.2125 | 1.7221 | 43.8973 |
| 20 | 5.0145 | 11.2489 | -21.0373 | 7.0673 | 37.8033 |
| 21 | - | 10.4511 | -21.2967 | -1.3751 | 35.4819 |
| 22 | - | 11.3553 | -20.7600 | 5.1718 | 46.7909 |
| 23 | 23.7836 | 8.1780 | -17.7781 | 16.9068 | 77.2629 |
| 24 | -21.1155 | -4.8654 | -29.2220 | 15.2649 | 20.3423 |
| 25 | 11.8936 | 23.2315 | -5.0357 | 22.6422 | 49.7366 |
| 26 | 6.3647 | 8.5955 | -19.9654 | 2.8400 | 30.5118 |
| 27 | 9.3420 | 11.3768 | -14.8555 | -5.3425 | 23.5830 |
| 28 | 24.3534 | 12.8579 | -13.2439 | 31.0925 | 41.3589 |
| 29 | -8.6012 | 4.5608 | -15.6332 | 11.7197 | 44.1217 |
| 30 | - | -1.4073 | -22.4474 | 16.4434 | 9.7233 |
| 31 | -8.5316 | 1.3315 | -18.9174 | - | 9.3725 |
| 32 | -15.8391 | -0.6325 | -25.2025 | -18.3808 | 1.0688 |
| 33 | - | -13.7503 | -34.4747 | -6.1569 | 5.4090 |
| 34 | - | 6.0191 | 8.7009 | - | 16.0250 |
| 35 | -9.4256 | 12.4052 | -21.0172 | -14.7782 | 29.8806 |
| 36 | -6.1525 | 12.1086 | -15.6409 | 5.5290 | 45.4279 |
| 37 | 1.7771 | 17.7785 | -14.5224 | 2.4531 | 31.3950 |
| 38 | 10.4169 | 15.2862 | -11.5336 | -6.4582 | 29.9248 |
| 39 | -17.4679 | -3.1605 | -36.8463 | -21.8138 | 9.9727 |
| 40 | -4.5607 | 14.9553 | -16.7250 | 3.9759 | 30.5733 |
| 41 | 37.4491 | 9.6779 | -9.5937 | - | 29.2305 |
| 42 | -8.1449 | 11.7410 | -20.0765 | -2.9473 | 27.5033 |
| 43 | 2.8205 | 7.7426 | -17.2859 | 25.6652 | 44.2248 |
| 44 | -4.6627 | 18.0697 | -10.2626 | 6.3317 | 30.0755 |
| 45 | -8.5575 | 18.5628 | -14.4942 | -3.7182 | 28.8772 |
| 46 | -8.5575 | 18.5628 | -14.4942 | -3.7182 | 28.8772 |
| 47 | -8.5575 | 18.5628 | -14.4942 | -3.7182 | 28.8772 |
| 48 | -10.9894 | 17.2435 | -16.5295 | -6.1940 | 28.0650 |

Tabell E.6: Standardavvik beregnet for alle fartøy for froude tall mellom 0.2 og 0.3

| Nummer | ANN | Digernes | Hollenbach | Holtrop | Oortmerssen |
|--------|---------|----------|------------|---------|-------------|
| 1 | 8.1016 | 16.2044 | 8.9507 | - | 21.9085 |
| 2 | 3.3602 | 6.9433 | 8.5644 | - | 11.8459 |
| 3 | 3.5086 | 3.9275 | 8.4477 | 3.5388 | 11.5375 |
| 4 | 3.0145 | 1.9231 | 15.6867 | 6.4143 | 8.6862 |
| 5 | 7.0154 | 19.5976 | 2.5661 | 7.8931 | 29.0808 |
| 6 | 3.2774 | 16.1405 | 6.9310 | 3.2774 | 22.5322 |
| 7 | 4.9788 | 12.5562 | 8.6488 | - | 19.1445 |
| 8 | 3.4224 | 7.3888 | 8.1756 | - | 12.2796 |
| 9 | 19.9069 | 9.8711 | 3.8285 | - | 83.0954 |
| 10 | 14.1575 | 9.4193 | 1.5124 | - | 44.7920 |
| 11 | 2.7259 | 4.7595 | 5.9808 | 1.2644 | 12.6012 |
| 12 | 6.1685 | 1.8991 | 15.2502 | 7.6894 | 8.2166 |
| 13 | 2.9591 | 7.4796 | 3.4438 | - | 18.2020 |
| 14 | 13.3615 | 4.0850 | 14.3713 | - | 10.0896 |
| 15 | 2.8613 | 12.9597 | 7.0040 | 5.4499 | 23.0456 |
| 16 | 7.1373 | 9.4790 | 10.9538 | 29.1123 | 16.0306 |
| 17 | 6.7894 | 9.7457 | 3.6504 | - | 56.3850 |
| 18 | 4.6962 | 8.2217 | 5.9752 | - | 25.4634 |
| 19 | 4.7143 | 2.6688 | 24.2357 | 4.8382 | 27.6531 |
| 20 | 3.5304 | 6.2711 | 10.5464 | 5.7319 | 22.9032 |
| 21 | - | 5.4862 | 10.4191 | 4.6771 | 26.3840 |
| 22 | - | 6.0334 | 10.3353 | 5.2448 | 28.2571 |
| 23 | 12.3823 | 5.8641 | 9.1213 | 10.3318 | 41.5531 |
| 24 | 10.6353 | 3.1428 | 14.5160 | 14.1419 | 13.6452 |
| 25 | 7.5259 | 10.7105 | 2.8860 | 11.9339 | 23.8119 |
| 26 | 8.5488 | 4.7805 | 9.9069 | 6.4142 | 17.6740 |
| 27 | 8.8395 | 8.1419 | 8.0190 | 7.0766 | 17.2701 |
| 28 | 12.1248 | 6.1340 | 6.5927 | 15.0980 | 19.4337 |
| 29 | 5.2316 | 3.8627 | 9.1855 | 6.8367 | 25.3465 |
| 30 | - | 2.0928 | 10.6602 | 8.6431 | 4.6998 |
| 31 | 4.0849 | 1.1385 | 7.9386 | - | 7.1320 |
| 32 | 11.5771 | 6.7094 | 14.0317 | 12.5622 | 9.8041 |
| 33 | - | 7.8514 | 17.4842 | 5.5914 | 9.0476 |
| 34 | - | 2.5006 | 4.5921 | - | 5.6979 |
| 35 | 4.8155 | 8.1335 | 10.6363 | 7.7137 | 15.6574 |
| 36 | 3.6368 | 7.7253 | 8.5869 | 3.8558 | 24.1651 |
| 37 | 1.6803 | 7.4557 | 6.1154 | 1.2550 | 13.1201 |
| 38 | 9.1159 | 8.8698 | 6.8198 | 8.4028 | 20.4206 |
| 39 | 11.2611 | 5.7138 | 18.4580 | 12.5059 | 8.9982 |
| 40 | 4.3755 | 7.9519 | 9.0023 | 3.3957 | 18.2212 |
| 41 | 16.3456 | 4.4655 | 5.1840 | - | 15.1370 |
| 42 | 5.9903 | 5.8641 | 9.9118 | 3.5360 | 14.5672 |
| 43 | 2.3914 | 4.2348 | 8.7553 | 12.8181 | 22.9802 |
| 44 | 3.7626 | 7.6259 | 4.4158 | 3.0916 | 13.9368 |
| 45 | 5.9490 | 8.1021 | 6.3344 | 4.3803 | 14.2596 |
| 46 | 5.9490 | 8.1021 | 6.3344 | 4.3803 | 14.2596 |
| 47 | 5.9490 | 8.1021 | 6.3344 | 4.3803 | 14.2596 |
| 48 | 5.4128 | 7.2007 | 6.8980 | 3.3555 | 12.8676 |

Tabell E.7: Middelavvik beregnet for alle fartøy for froude tall over 0.3

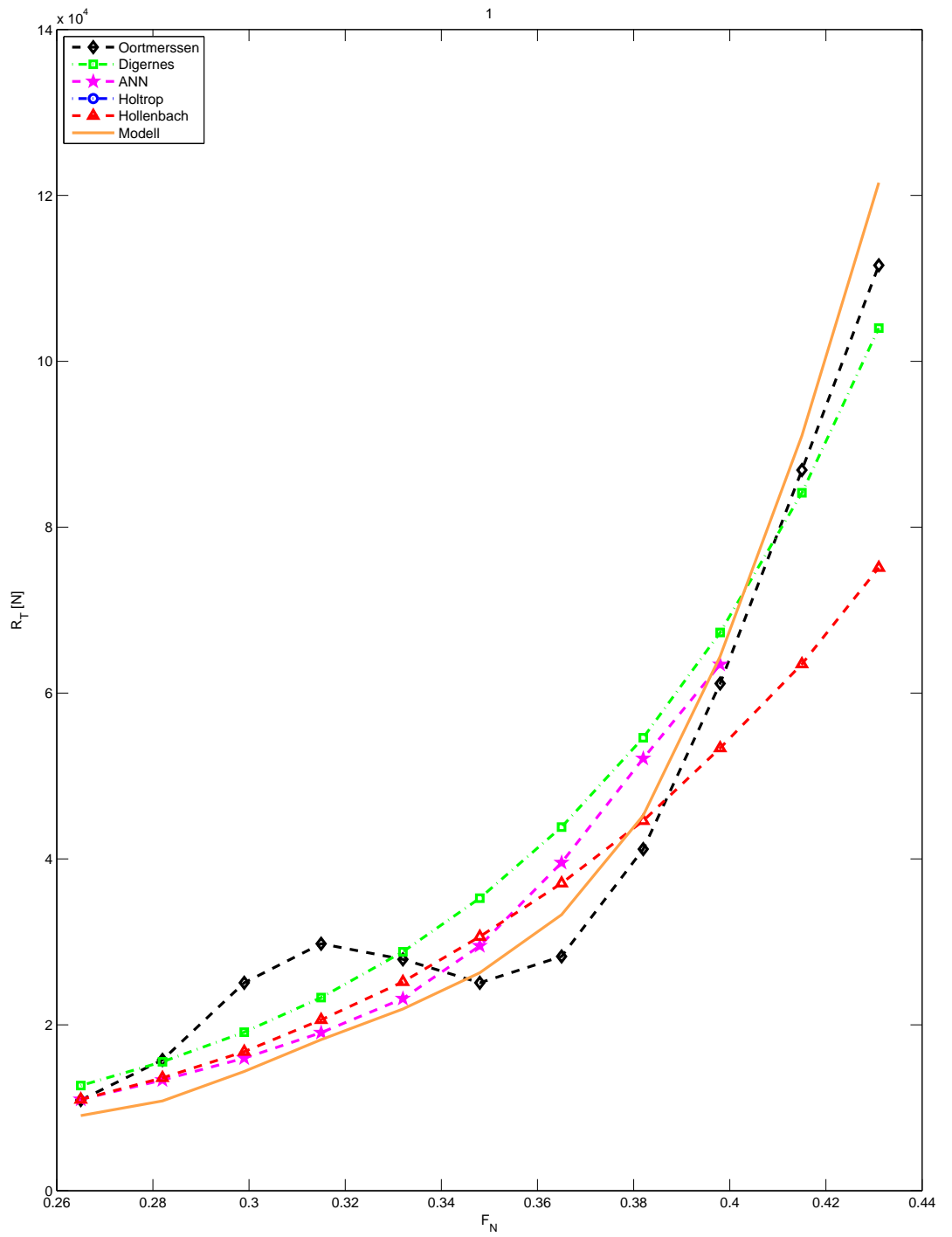
| Nummer | ANN | Digernes | Hollenbach | Holtrop | Oortmerssen |
|--------|----------|----------|------------|----------|-------------|
| 1 | 9.2081 | 16.0670 | -10.3098 | - | 5.5453 |
| 2 | 10.2933 | 6.6471 | -33.2329 | - | 1.7254 |
| 3 | 6.4939 | -4.1465 | -58.8318 | 17.5576 | 13.3830 |
| 4 | -2.4049 | -3.8803 | -47.8025 | -21.5967 | 11.2125 |
| 5 | 10.9094 | 7.8846 | -4.8817 | 3.2174 | 49.0780 |
| 6 | -6.1694 | 16.8057 | -8.8718 | -3.0847 | 39.2900 |
| 7 | -12.5461 | 22.4843 | 26.5049 | - | 13.5420 |
| 8 | 12.2081 | 11.1958 | -3.4763 | - | 4.8635 |
| 9 | 13.5053 | 19.1241 | 22.4145 | - | 142.1386 |
| 10 | 20.8366 | 12.4959 | 137.5403 | - | 65.4275 |
| 11 | 7.6826 | 1.1426 | -41.4627 | 13.2671 | 18.6288 |
| 12 | 0.8293 | -5.8705 | -49.2796 | -28.4458 | 6.0178 |
| 13 | 1.3682 | 8.6959 | 3.8671 | - | 27.5242 |
| 14 | 12.0323 | -1.8675 | -23.8668 | - | 3.7044 |
| 15 | -5.9443 | -27.1022 | -4.5629 | -0.6078 | 21.2647 |
| 16 | -15.1381 | -8.3499 | -9.9020 | 12.4160 | 30.9573 |
| 17 | -15.2546 | 8.8674 | 11.6735 | - | 162.1443 |
| 18 | -1.0398 | 2.9648 | 124.9524 | - | 70.1644 |
| 19 | -20.0669 | -13.6340 | -26.8383 | -0.9879 | 61.0773 |
| 20 | -8.3365 | -6.2736 | -13.4791 | 0.1820 | 66.1081 |
| 21 | - | 25.4802 | -14.2642 | 7.2459 | 51.9243 |
| 22 | - | -2.9932 | -12.6276 | 0.8862 | 86.5004 |
| 23 | -5.4864 | -20.9391 | -14.2420 | 3.9604 | 74.2867 |
| 24 | -29.2703 | -7.9710 | -11.1666 | 28.4425 | 16.9096 |
| 25 | 20.0387 | 19.3689 | -11.3150 | 25.0325 | 35.9640 |
| 26 | 30.1518 | 15.4368 | -14.3768 | 13.9430 | 39.6429 |
| 27 | 32.8872 | 38.3726 | -1.6184 | 10.7708 | 52.6152 |
| 28 | 30.6275 | 6.9811 | -11.1162 | 38.3314 | 38.1767 |
| 29 | -23.2579 | -7.0816 | -2.8477 | 0.2041 | 61.2261 |
| 30 | - | 11.6312 | -9.7776 | 46.1416 | 13.6783 |
| 31 | -0.1393 | 5.5360 | -20.3283 | - | 1.5955 |
| 32 | 16.5195 | 31.4110 | -4.0649 | 8.4507 | 37.5854 |
| 33 | - | -12.7626 | -12.2486 | -1.5902 | 22.0034 |
| 34 | - | -1.8991 | 47.1277 | - | 16.2555 |
| 35 | -5.8220 | 0.2154 | -11.0237 | -6.3468 | 36.3615 |
| 36 | -11.4393 | -7.2003 | -6.1219 | 0.9536 | 29.2617 |
| 37 | 2.3847 | 8.5933 | -34.9183 | -9.5271 | 20.3689 |
| 38 | 17.9048 | 22.9782 | -9.5728 | 7.0813 | 44.6310 |
| 39 | 2.7345 | 12.3894 | -5.4971 | -1.0560 | 40.5793 |
| 40 | -0.1470 | 9.9636 | -8.4765 | -0.8664 | 23.3968 |
| 41 | 30.1382 | 10.0270 | -5.4231 | - | 1.0197 |
| 42 | 15.2268 | 18.7786 | -13.4502 | 3.2636 | 43.1973 |
| 43 | -13.8263 | -3.5063 | -11.9409 | 11.3058 | 31.5048 |
| 44 | 2.0191 | 19.7925 | -8.3942 | 1.4154 | 52.5352 |
| 45 | 7.9538 | 30.3325 | -5.8779 | 5.5330 | 69.3901 |
| 46 | 7.9538 | 30.3325 | -5.8779 | 5.5330 | 69.3901 |
| 47 | 7.9538 | 30.3325 | -5.8779 | 5.5330 | 69.3901 |
| 48 | -5.4351 | 11.8176 | -7.3081 | -2.1422 | 56.3996 |

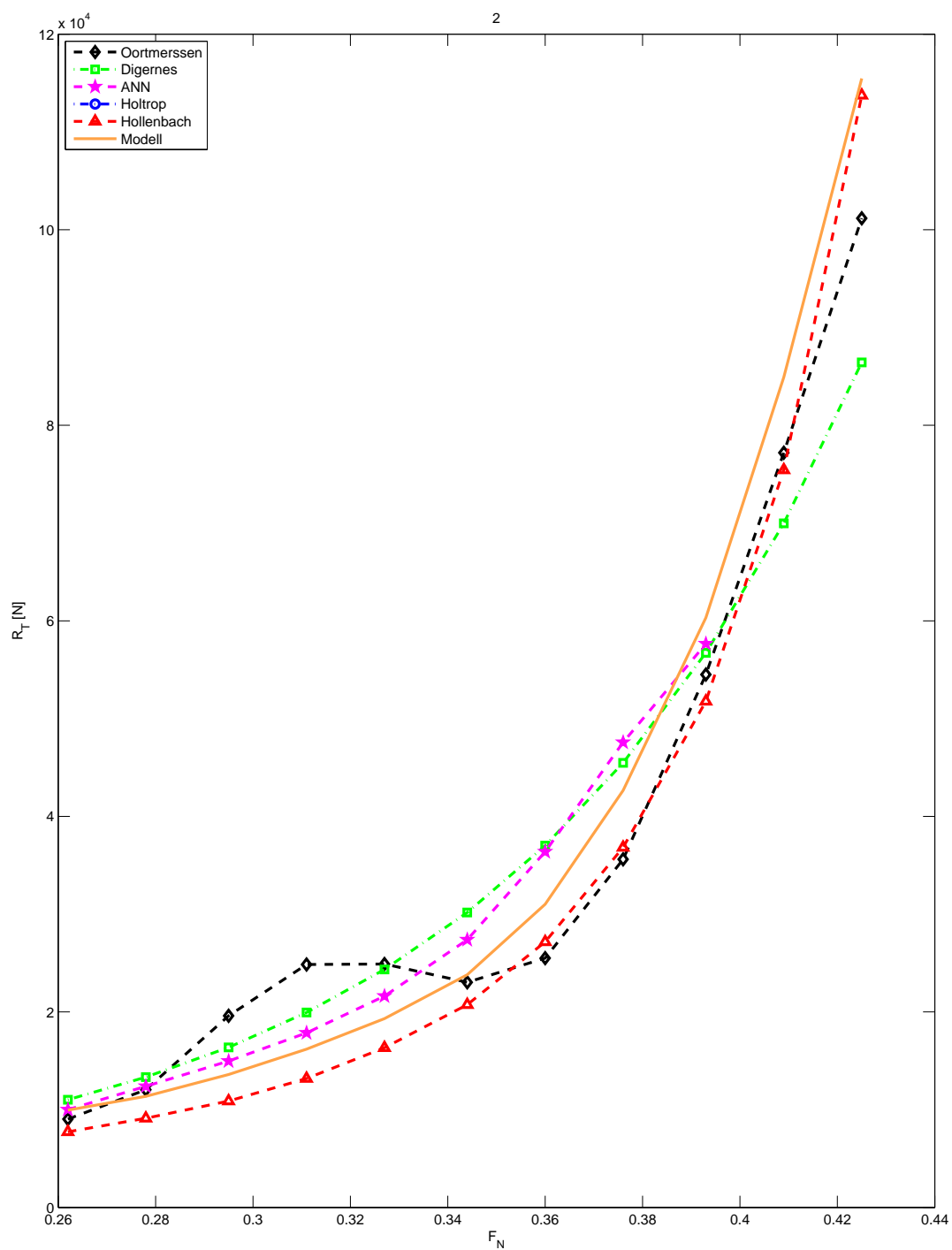
Tabell E.8: Standardavvik beregnet for alle fartøy for froude tall over 0.3

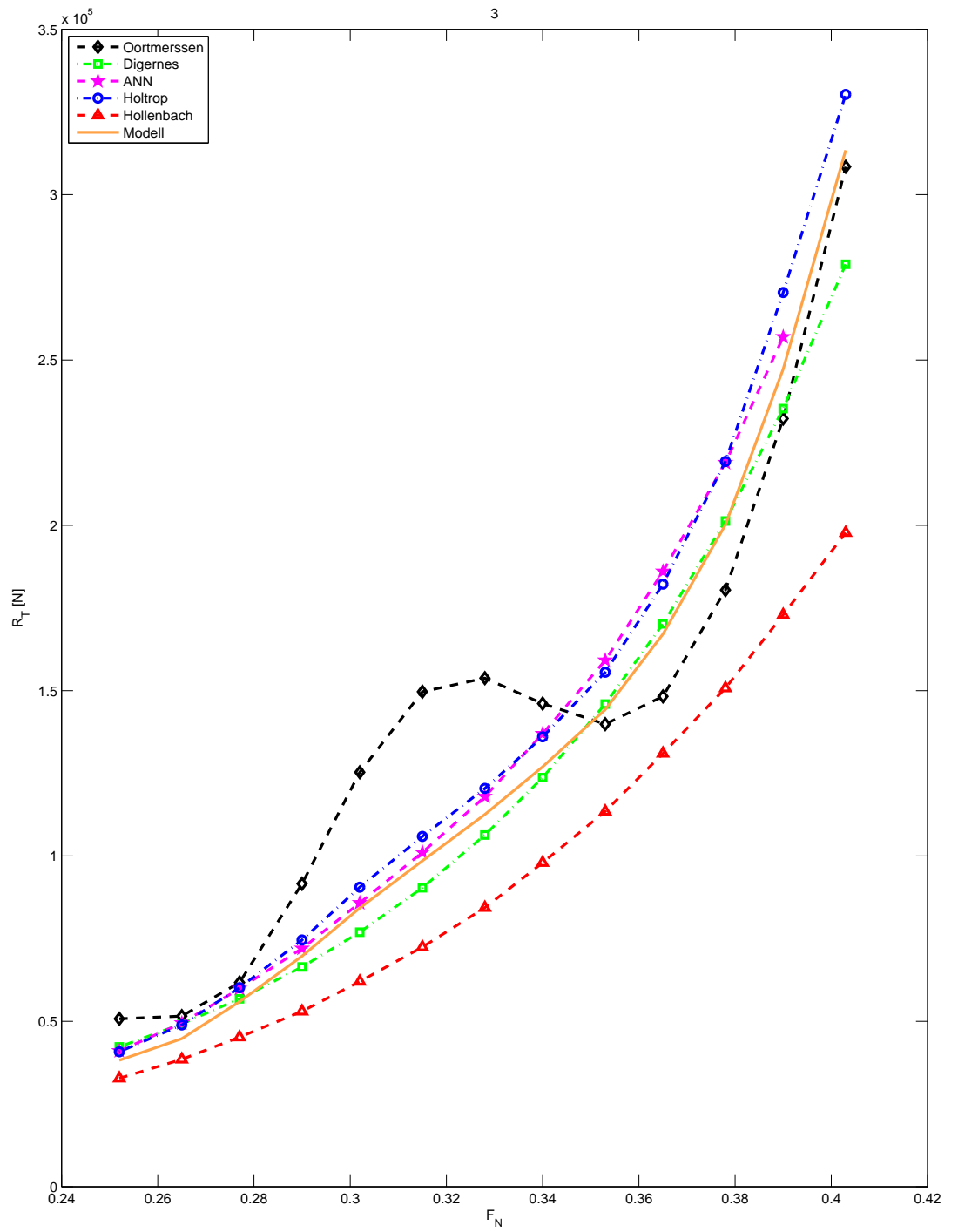
| Nummer | ANN | Digernes | Hollenbach | Holtrop | Oortmerssen |
|--------|---------|----------|------------|---------|-------------|
| 1 | 6.5069 | 15.9515 | 15.6069 | - | 19.0687 |
| 2 | 6.9365 | 14.9678 | 7.3290 | - | 18.1586 |
| 3 | 4.2447 | 4.1195 | 13.7593 | 4.0829 | 20.6011 |
| 4 | 5.0111 | 6.5344 | 15.6222 | 7.5087 | 17.2113 |
| 5 | 5.0274 | 4.1567 | 5.1943 | 4.1914 | 24.2525 |
| 6 | 4.0269 | 8.3052 | 8.8641 | 4.0269 | 22.8410 |
| 7 | 7.1195 | 17.1291 | 16.6661 | - | 14.7383 |
| 8 | 9.0032 | 15.5886 | 7.0642 | - | 13.5405 |
| 9 | 12.1696 | 13.1216 | 11.7303 | - | 79.1983 |
| 10 | 15.3830 | 12.4970 | 41.7297 | - | 38.1379 |
| 11 | 4.4542 | 3.2774 | 10.2509 | 3.0823 | 18.0152 |
| 12 | 6.7265 | 7.6411 | 15.9987 | 9.6722 | 13.6754 |
| 13 | 1.2454 | 5.5661 | 4.5074 | - | 21.0261 |
| 14 | 11.4109 | 6.5316 | 10.5401 | - | 10.3854 |
| 15 | 2.1133 | 9.5368 | 8.0281 | 1.1823 | 7.7304 |
| 16 | 6.2788 | 3.5448 | 13.6805 | 17.1519 | 13.4810 |
| 17 | 9.1541 | 8.1154 | 7.6511 | - | 94.9943 |
| 18 | 8.4652 | 5.8079 | 62.5523 | - | 42.9078 |
| 19 | 7.0631 | 4.7974 | 23.6154 | 1.5406 | 24.6558 |
| 20 | 2.9567 | 2.2091 | 11.8576 | 1.1673 | 25.4115 |
| 21 | - | 11.9248 | 8.2738 | 4.5052 | 42.1012 |
| 22 | - | 1.0612 | 11.1086 | 1.3655 | 32.6125 |
| 23 | 2.8313 | 7.5198 | 12.5683 | 4.5931 | 30.5586 |
| 24 | 10.3158 | 2.8150 | 9.8232 | 25.0572 | 8.5580 |
| 25 | 9.4143 | 8.9786 | 5.5797 | 11.6683 | 25.2057 |
| 26 | 14.2233 | 7.3531 | 8.4220 | 8.1320 | 30.1579 |
| 27 | 13.8166 | 16.0029 | 2.3959 | 6.0858 | 25.4473 |
| 28 | 14.1669 | 4.1572 | 5.3528 | 17.9011 | 28.6431 |
| 29 | 6.0052 | 1.8285 | 5.1470 | 0.3689 | 15.8085 |
| 30 | - | 6.6197 | 4.5382 | 18.0428 | 18.4517 |
| 31 | 1.3392 | 3.2222 | 7.5531 | - | 9.0530 |
| 32 | 7.9186 | 14.9948 | 5.5442 | 7.0619 | 22.2174 |
| 33 | - | 4.4924 | 10.7761 | 1.8371 | 9.3498 |
| 34 | - | 2.1222 | 9.5090 | - | 18.2750 |
| 35 | 3.2364 | 1.3435 | 12.6531 | 7.2725 | 17.1675 |
| 36 | 4.0648 | 2.5378 | 7.5491 | 1.3755 | 11.6072 |
| 37 | 1.3623 | 4.2719 | 10.2355 | 3.0058 | 14.9250 |
| 38 | 10.8220 | 13.0644 | 9.2664 | 6.4545 | 27.0745 |
| 39 | 0.7061 | 3.1989 | 7.0967 | 1.3633 | 10.4775 |
| 40 | 0.5735 | 4.1721 | 8.1914 | 1.3858 | 13.2898 |
| 41 | 16.3276 | 5.7597 | 4.4265 | - | 10.6089 |
| 42 | 7.3853 | 8.9121 | 7.7407 | 2.0340 | 24.8160 |
| 43 | 5.8323 | 1.9841 | 8.2984 | 8.1254 | 18.8880 |
| 44 | 0.7455 | 6.9857 | 4.4323 | 0.9543 | 19.1193 |
| 45 | 2.0537 | 10.8251 | 3.1979 | 2.9733 | 24.6268 |
| 46 | 2.0537 | 10.8251 | 3.1979 | 2.9733 | 24.6268 |
| 47 | 2.0537 | 10.8251 | 3.1979 | 2.9733 | 24.6268 |
| 48 | 1.4033 | 3.0513 | 5.6608 | 1.6594 | 14.5623 |

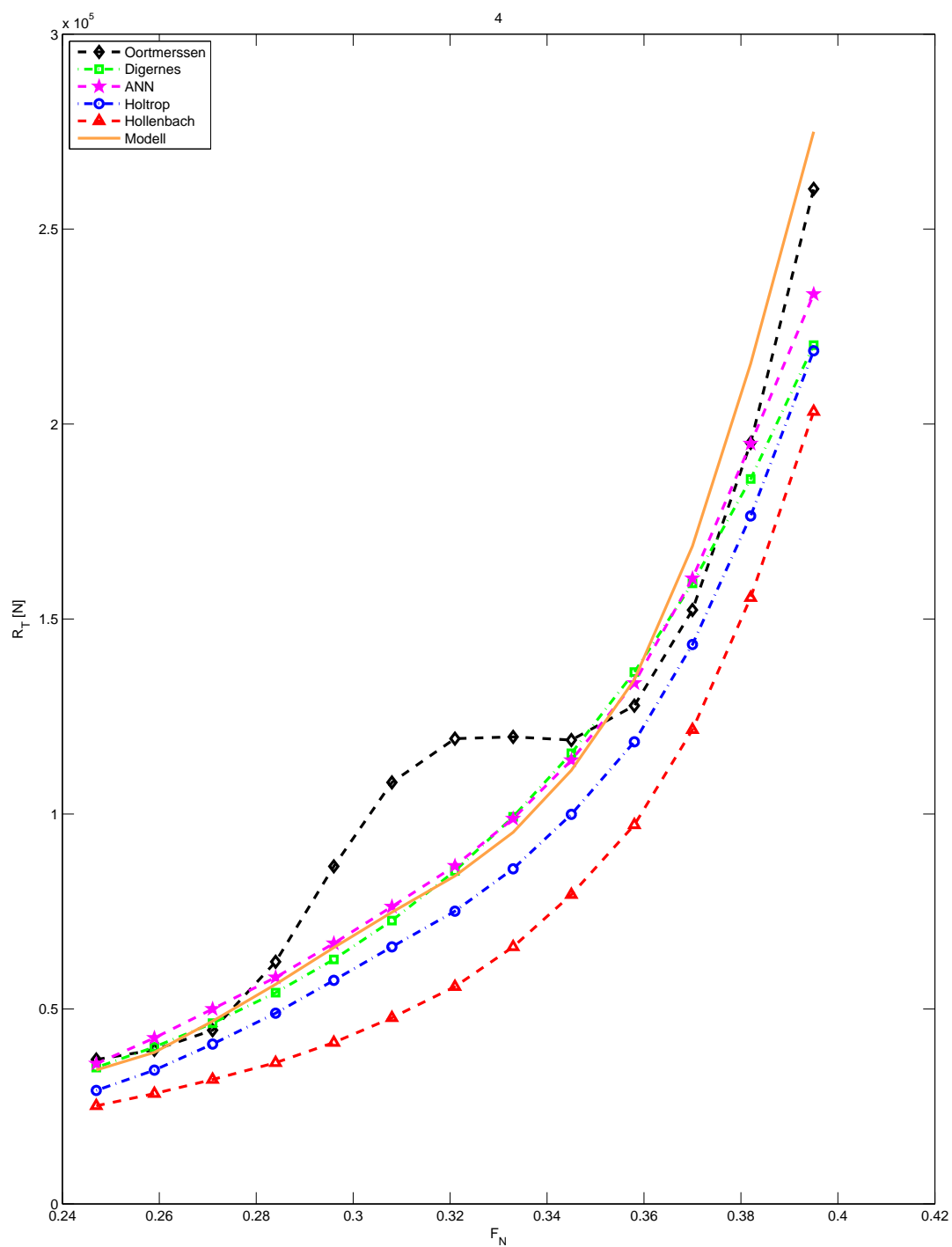
Tillegg F

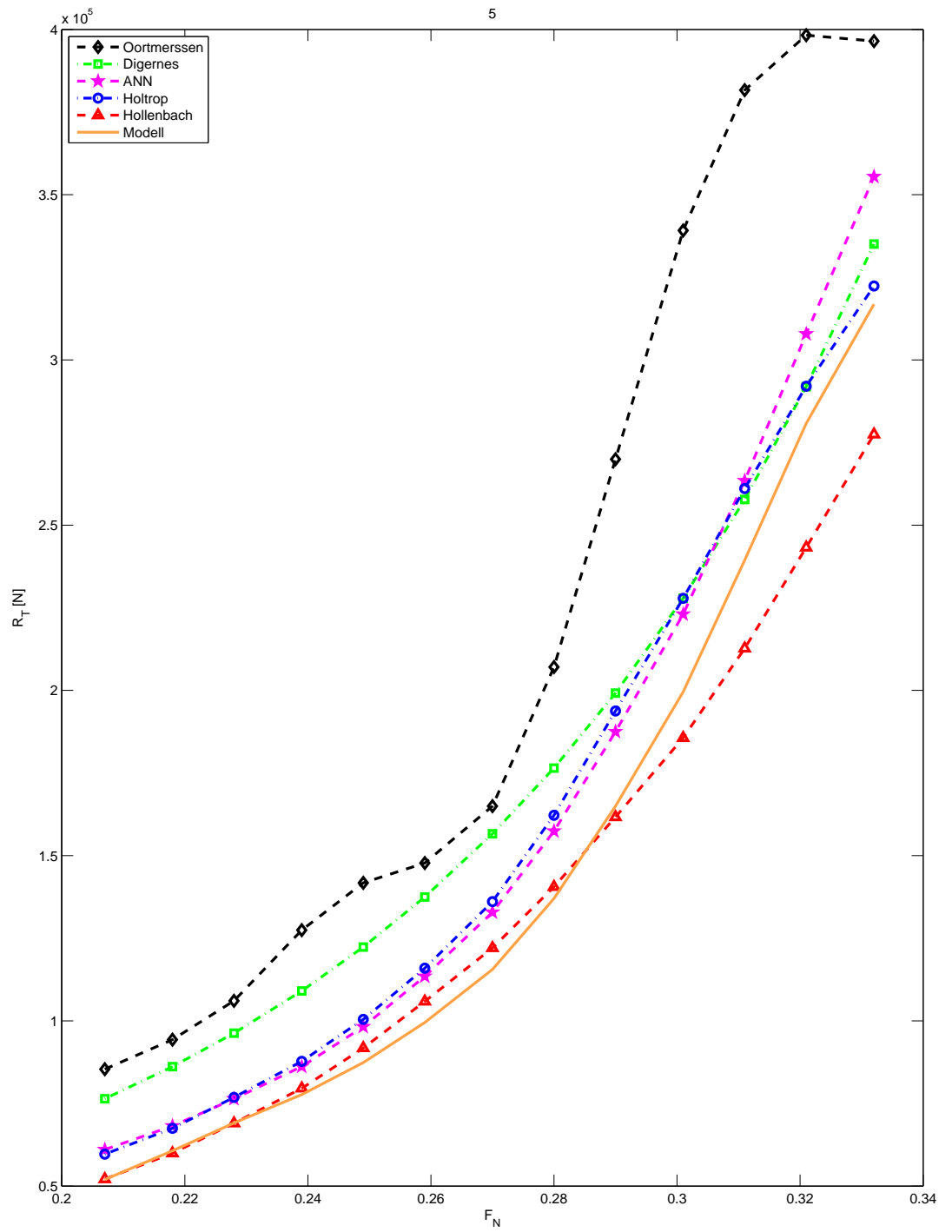
Motstandsplot

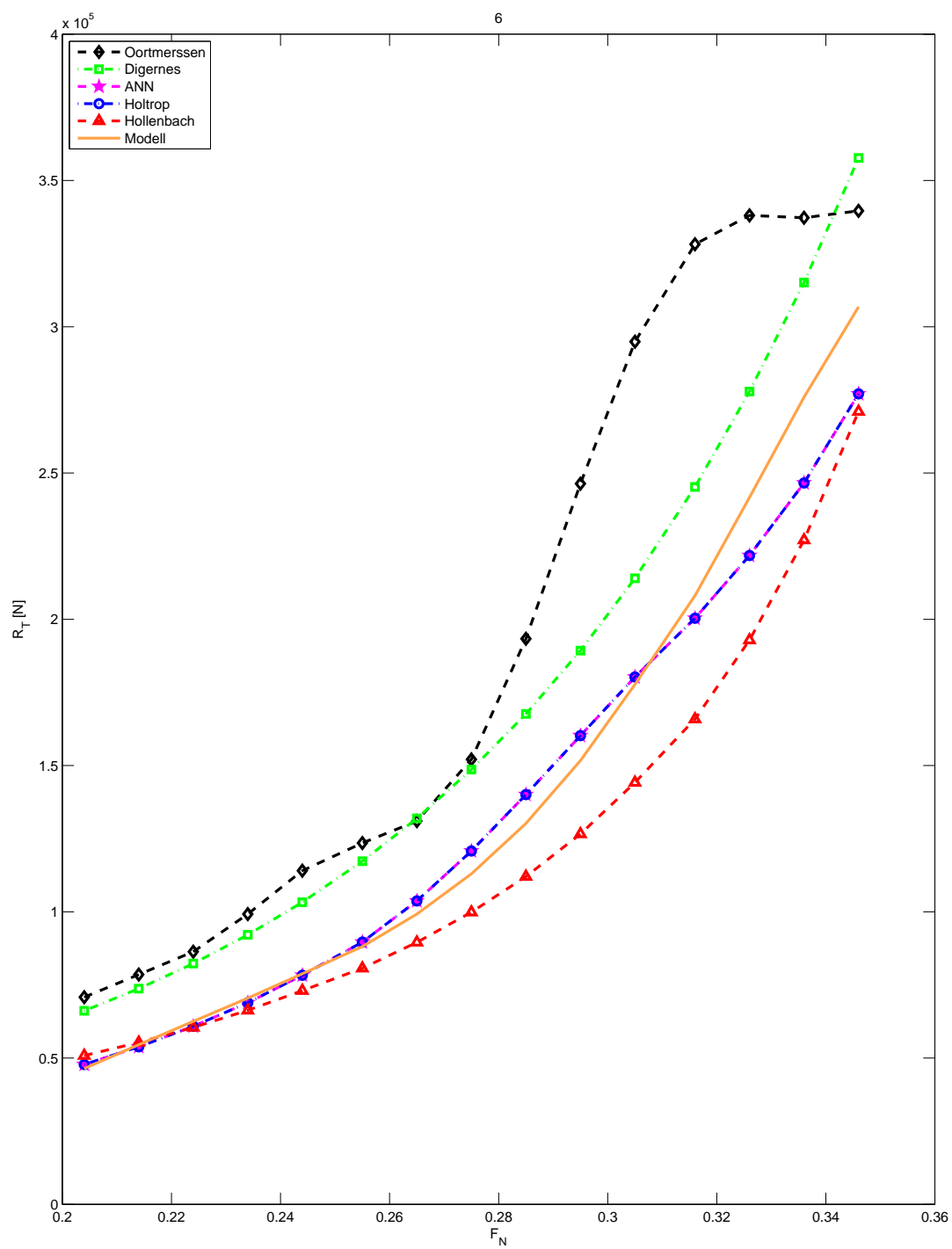


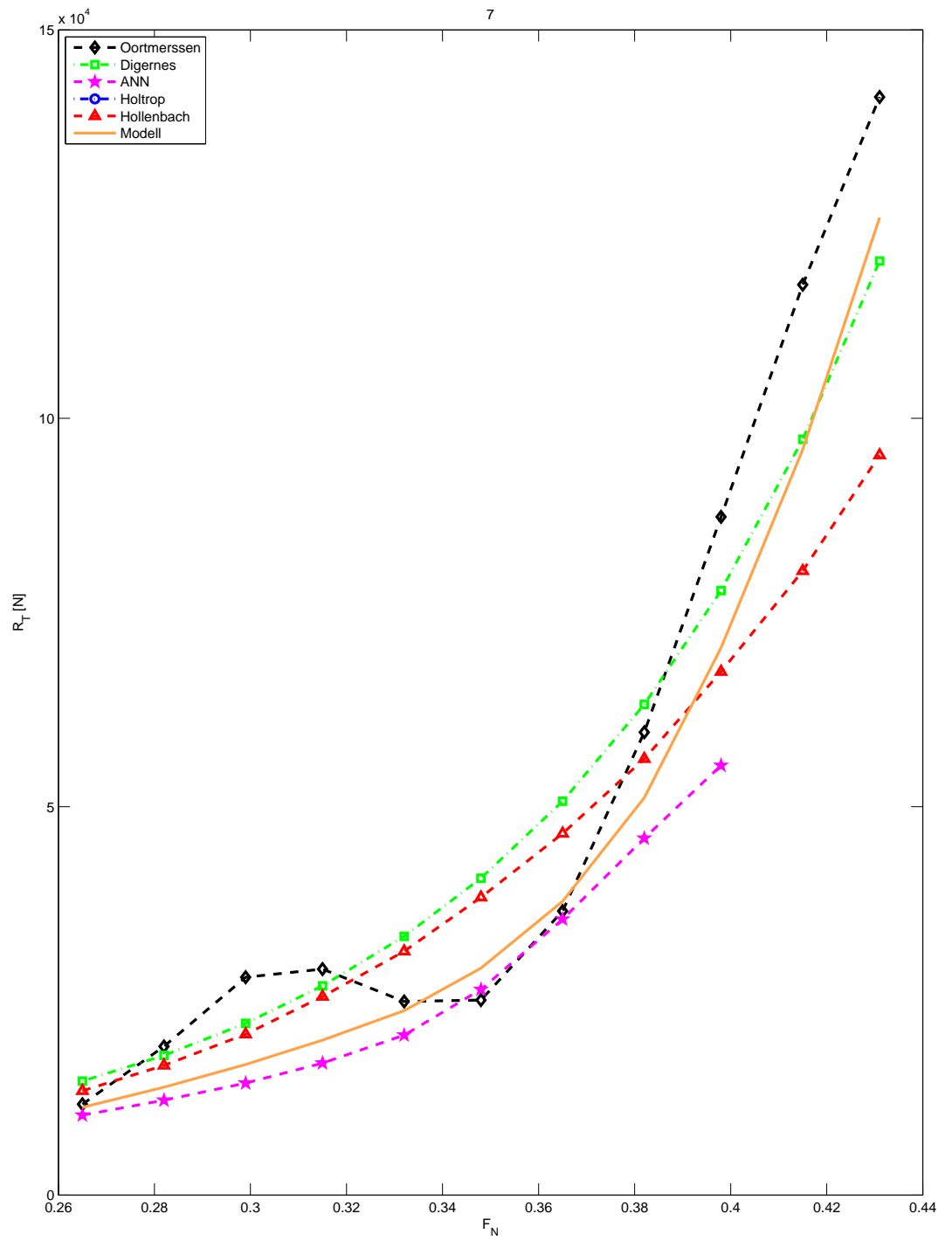




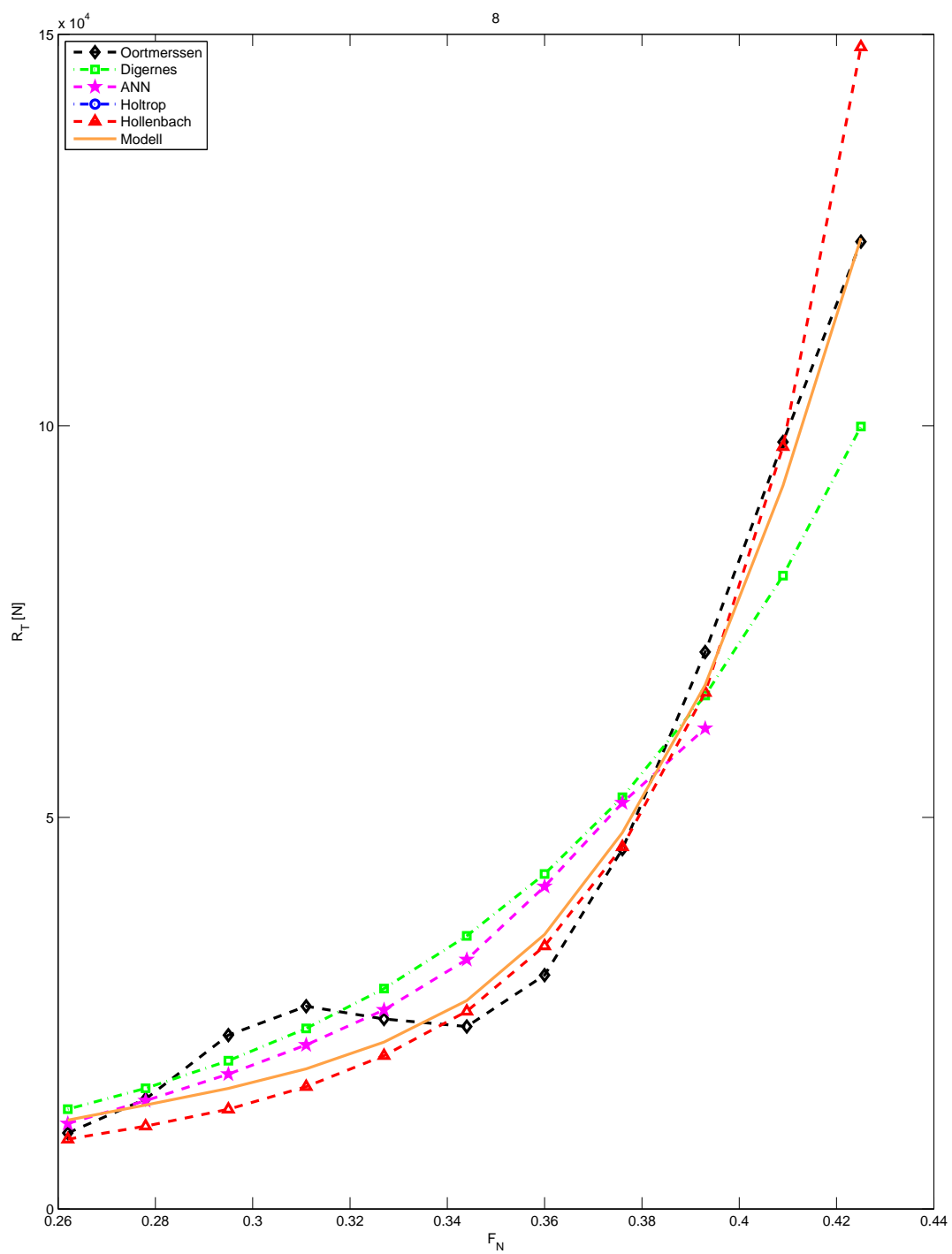


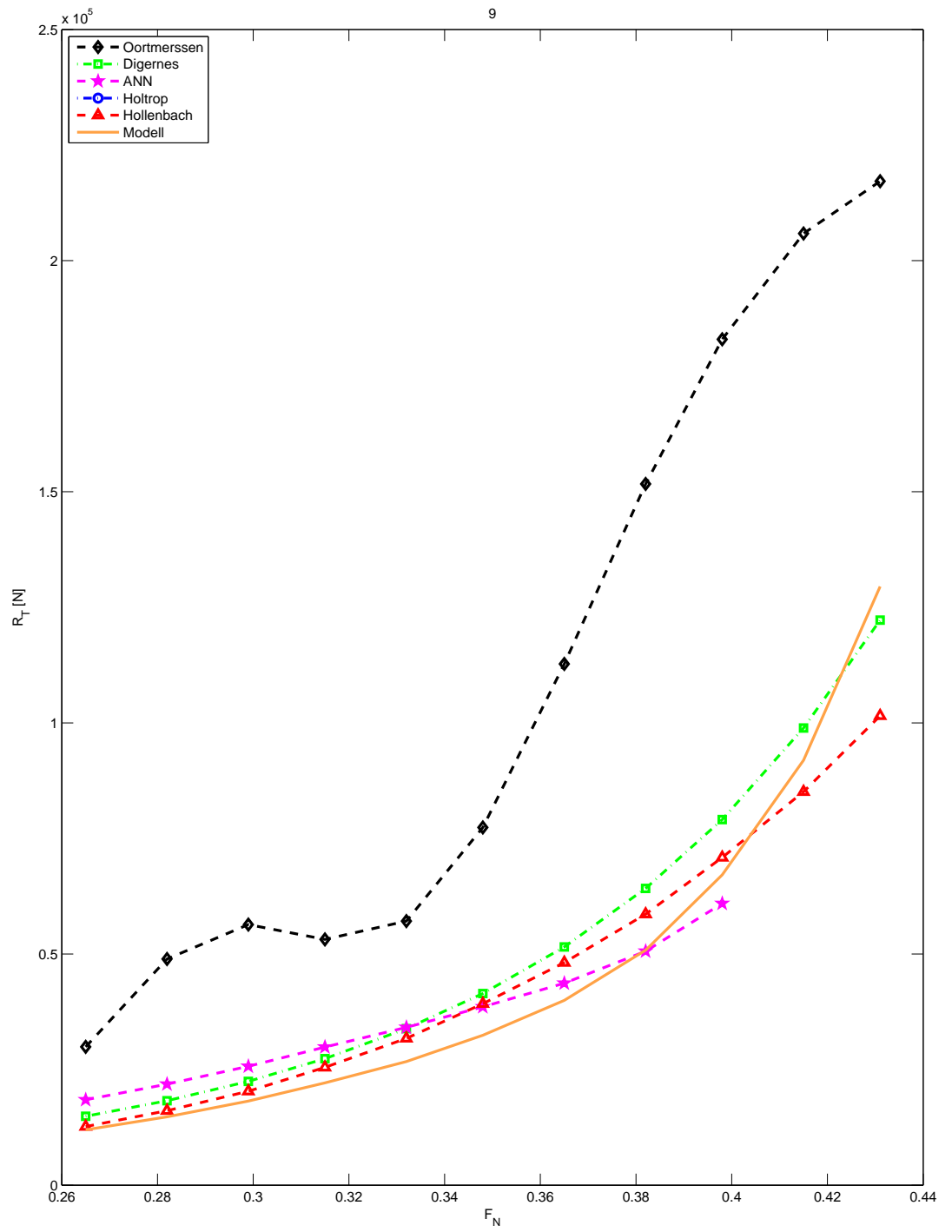


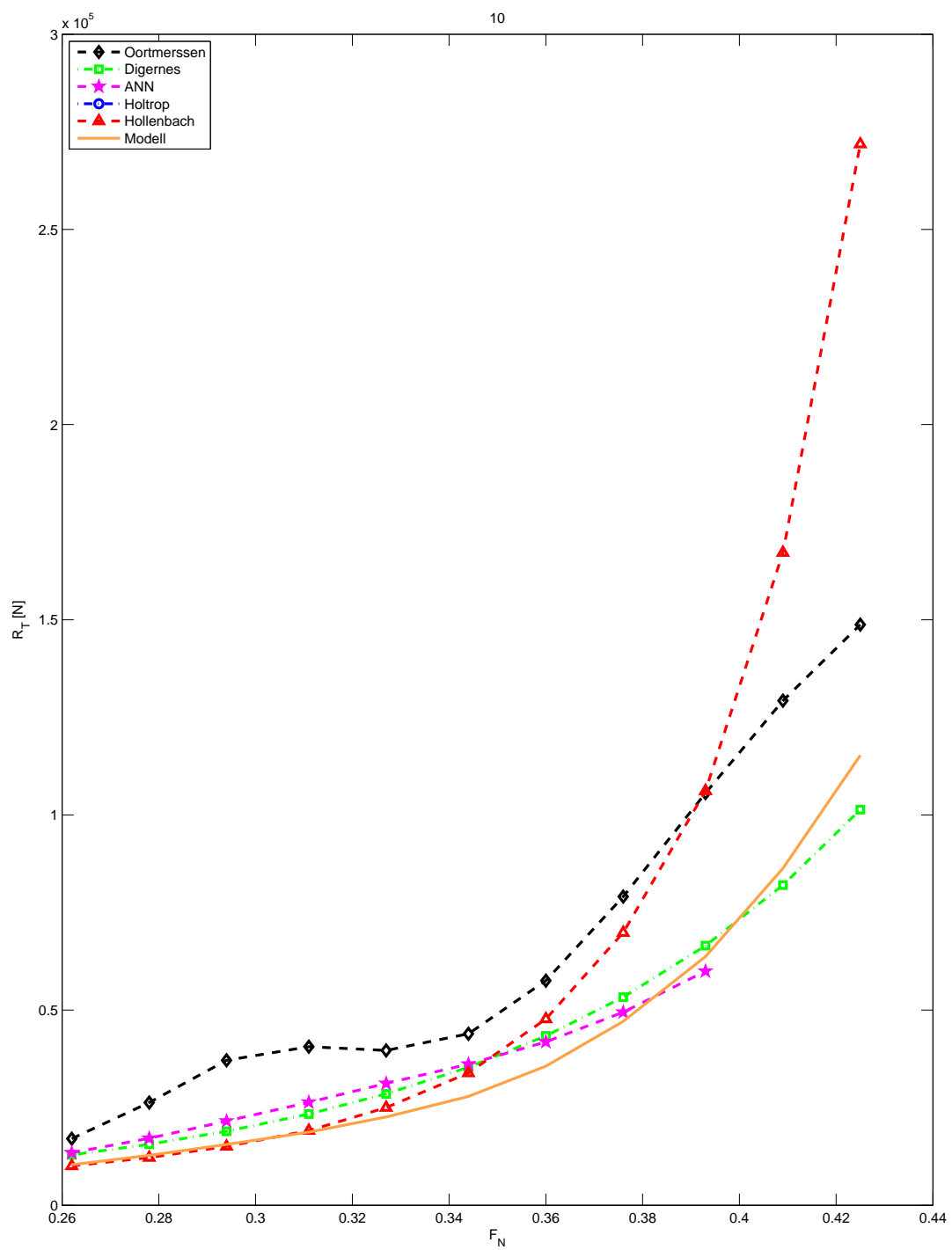


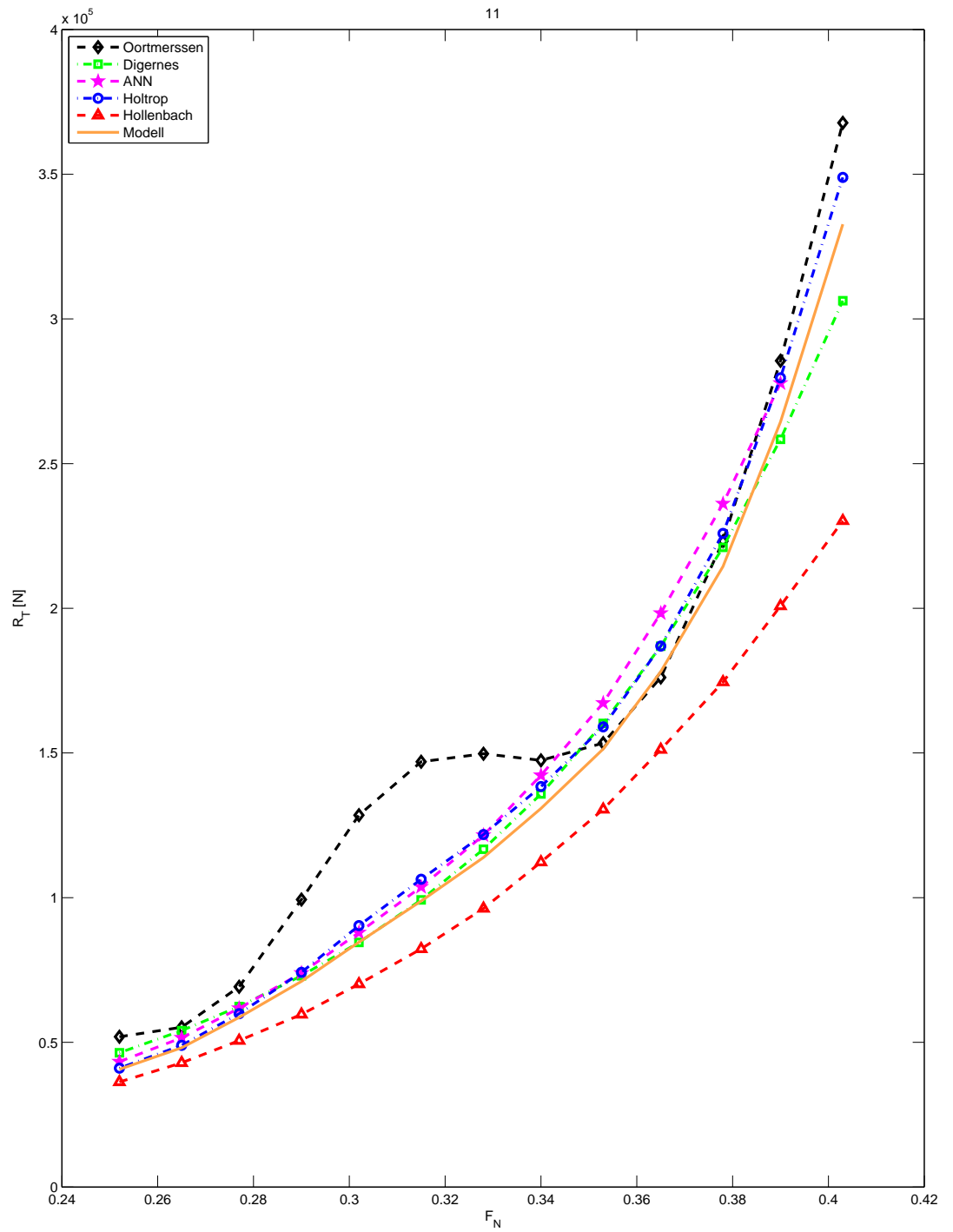


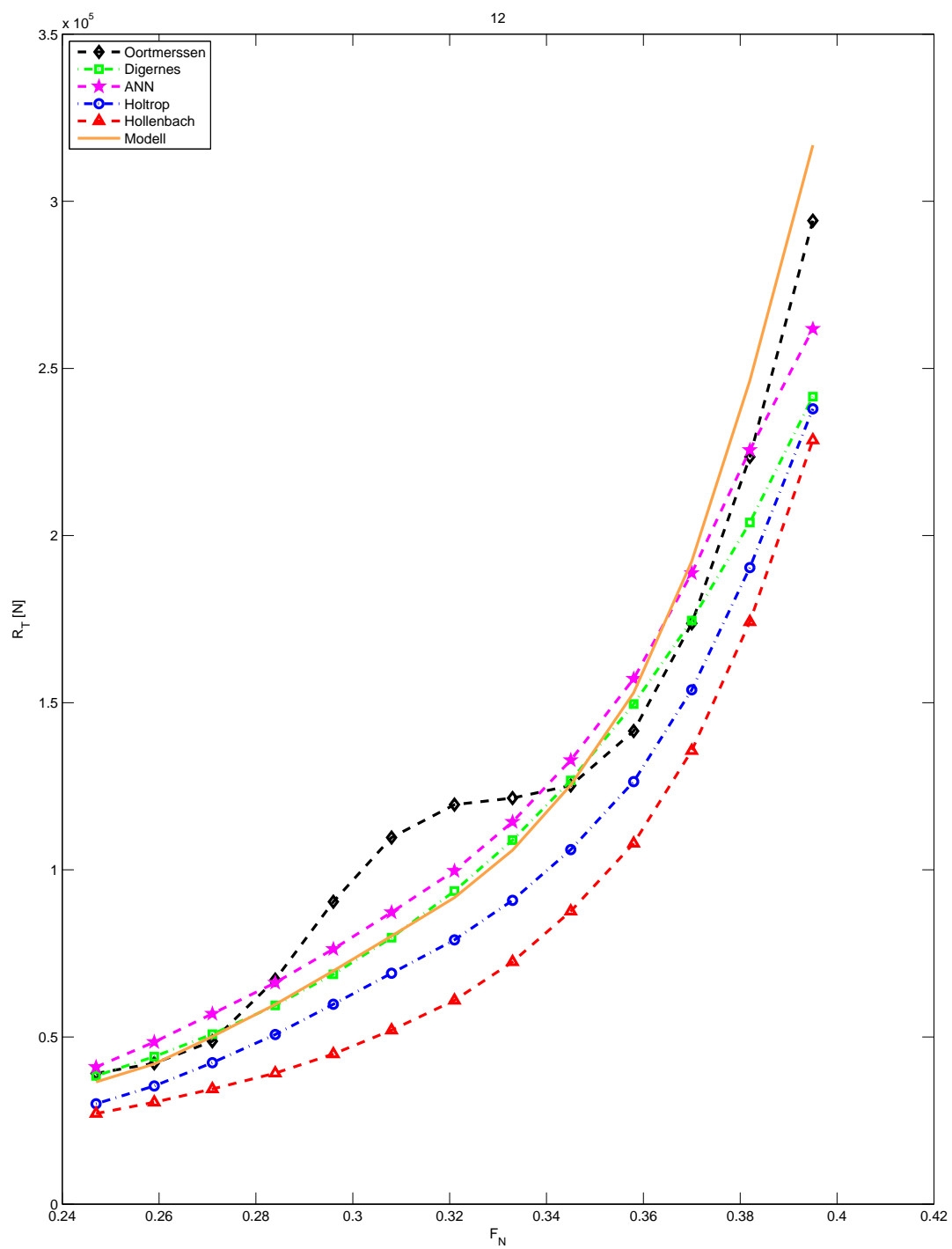
XXX

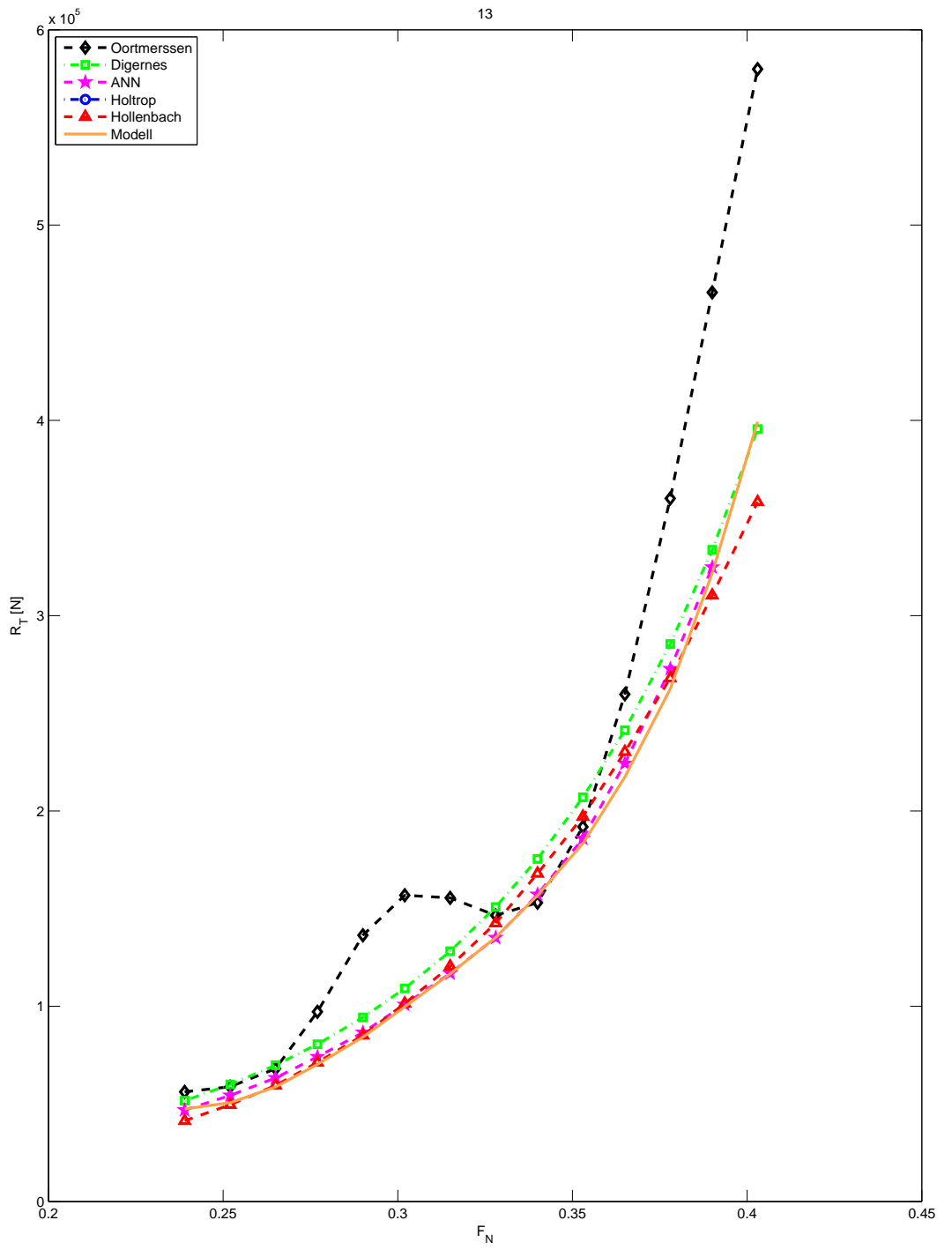


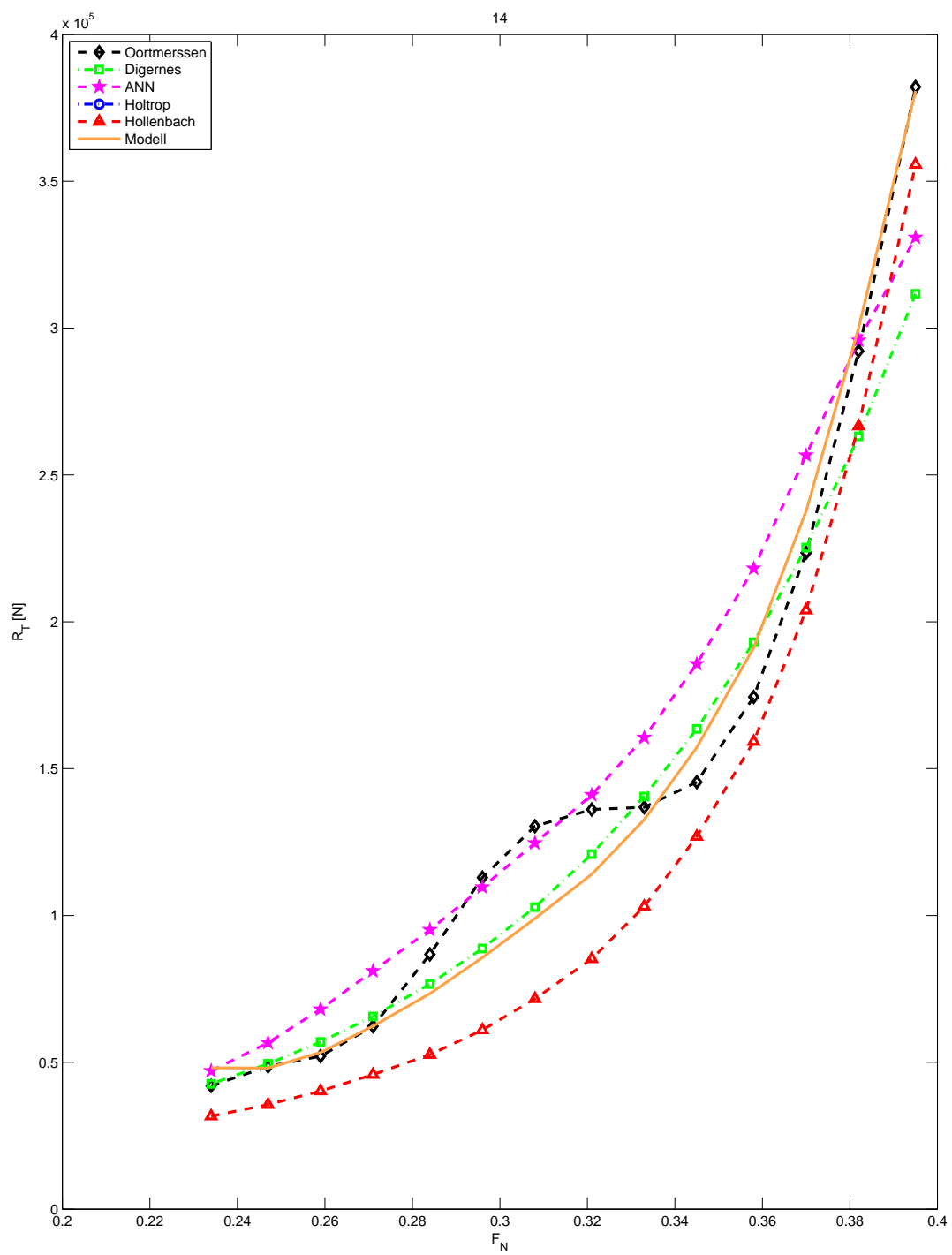


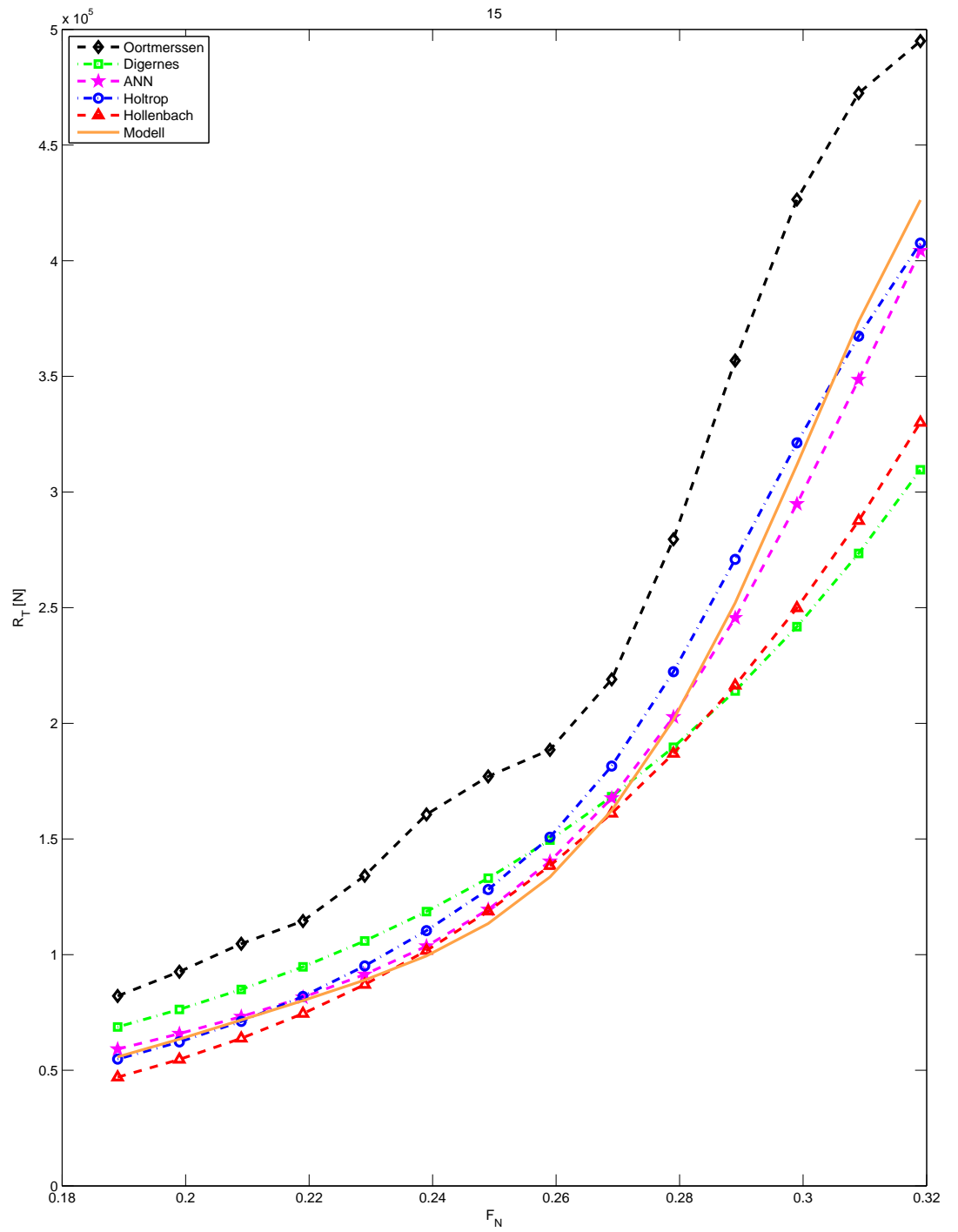


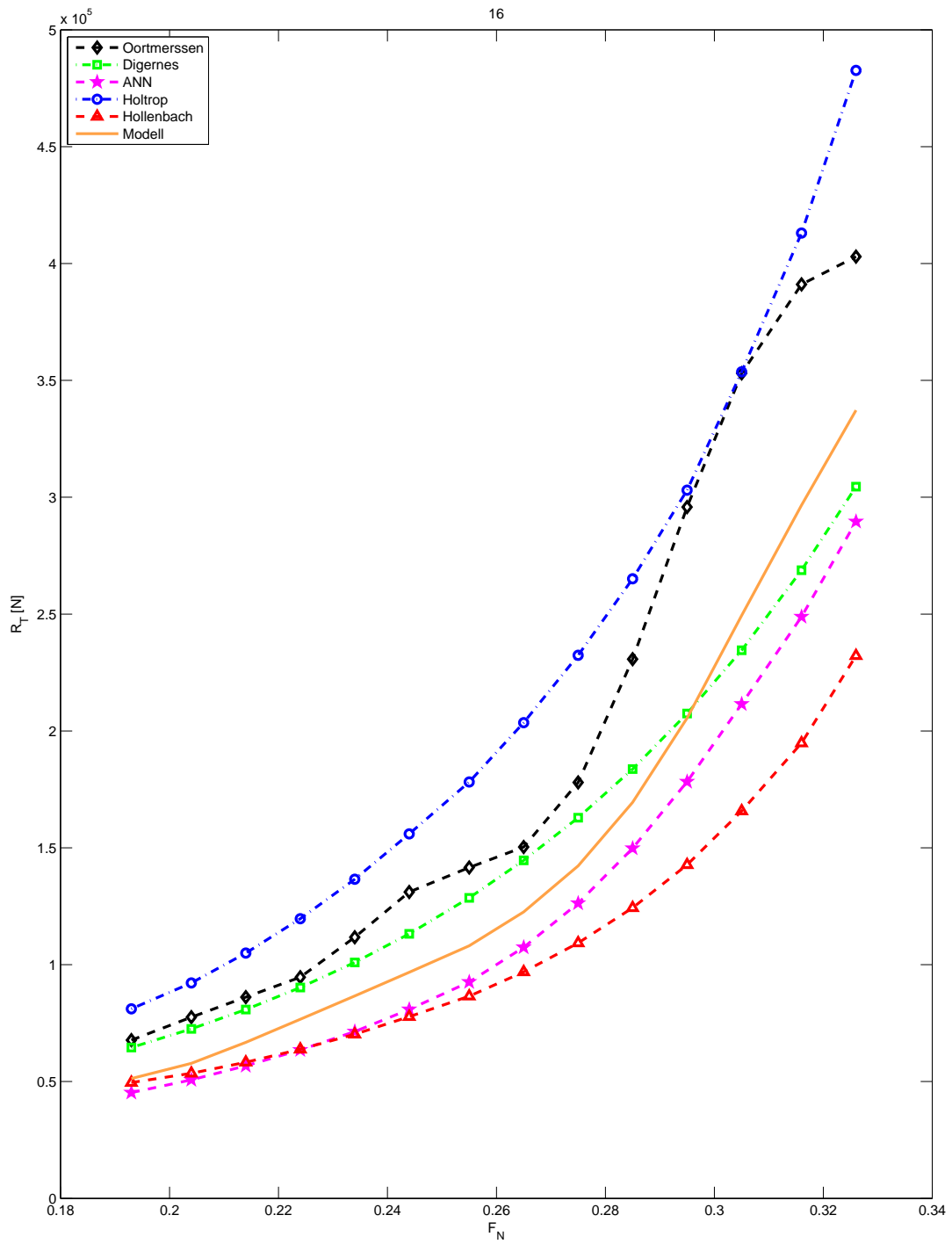


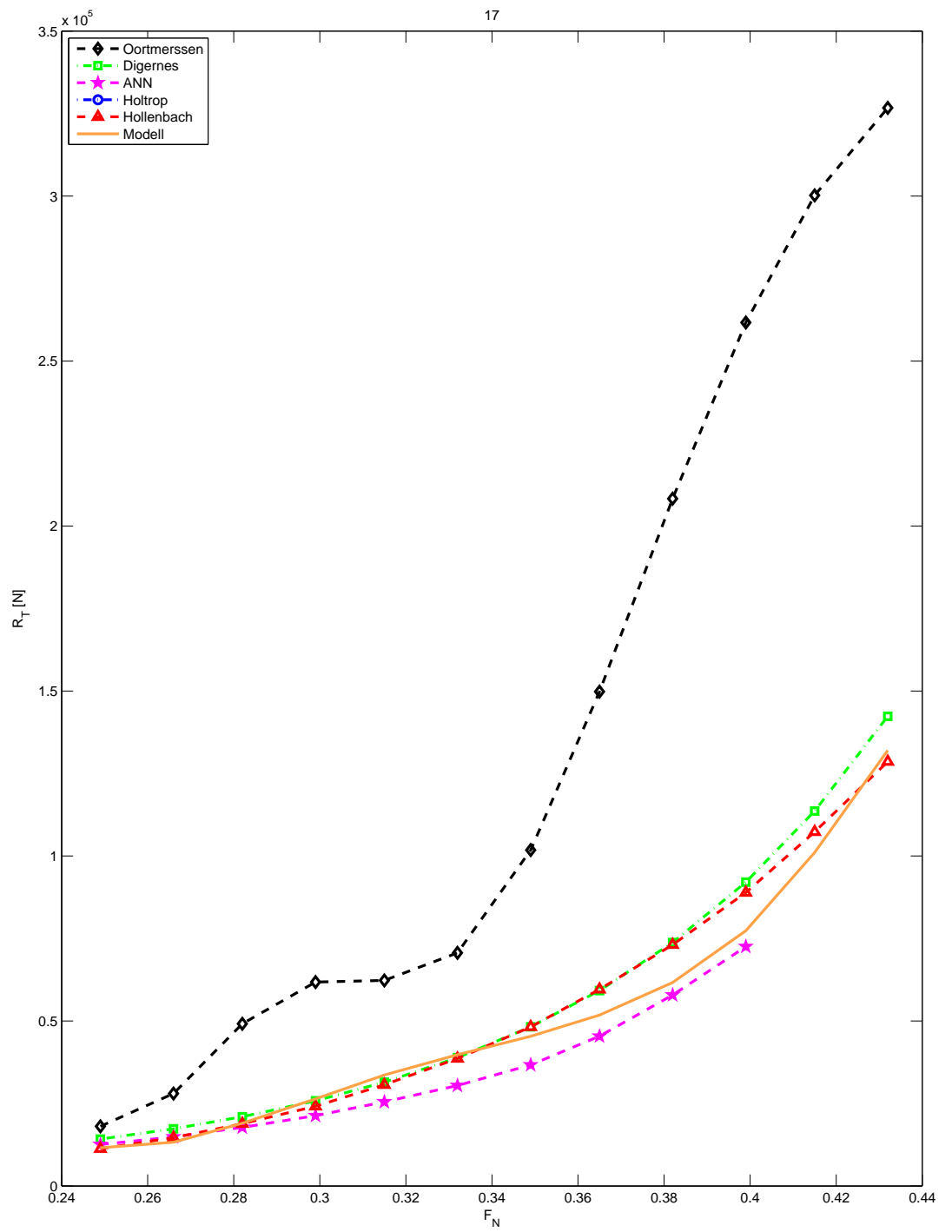




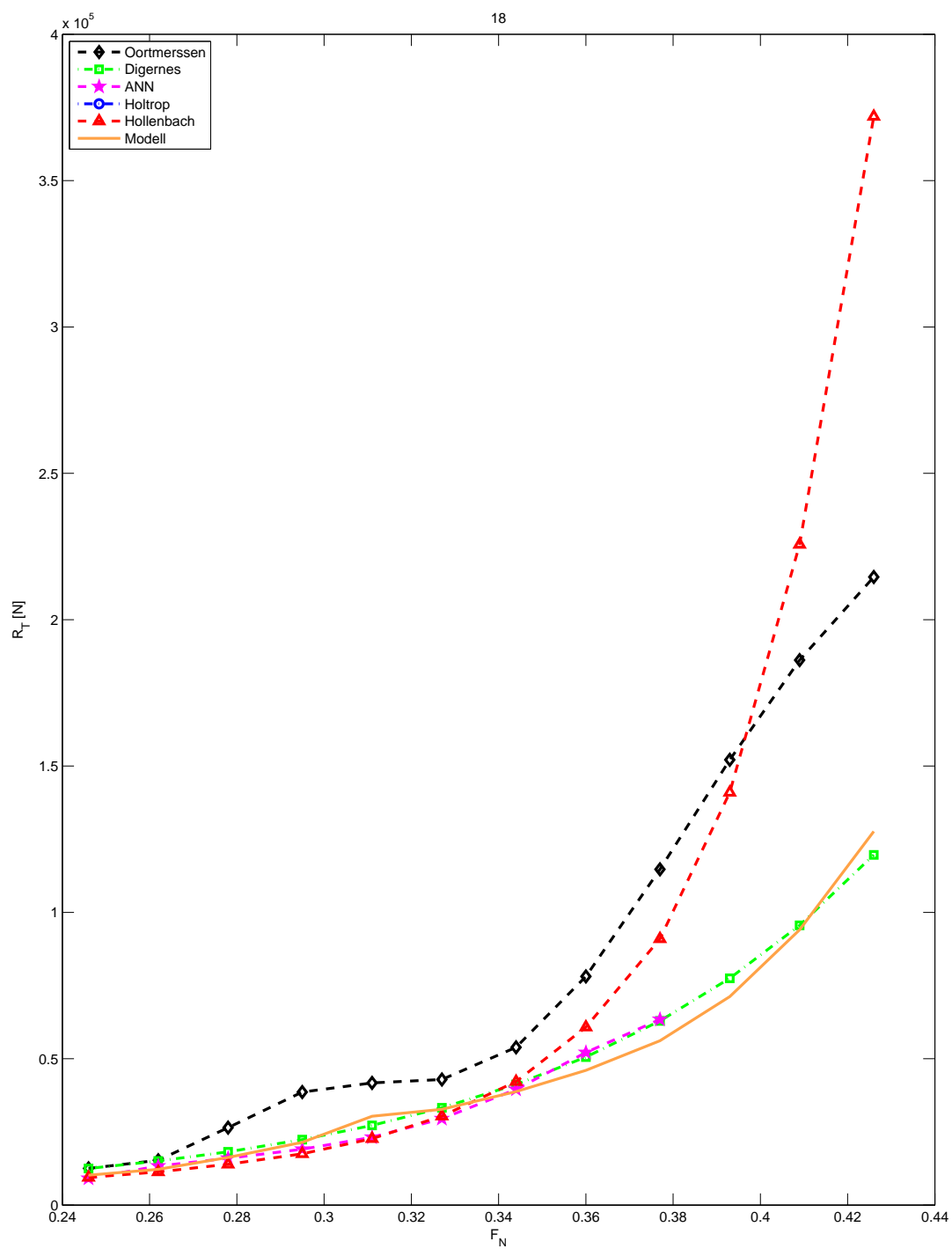


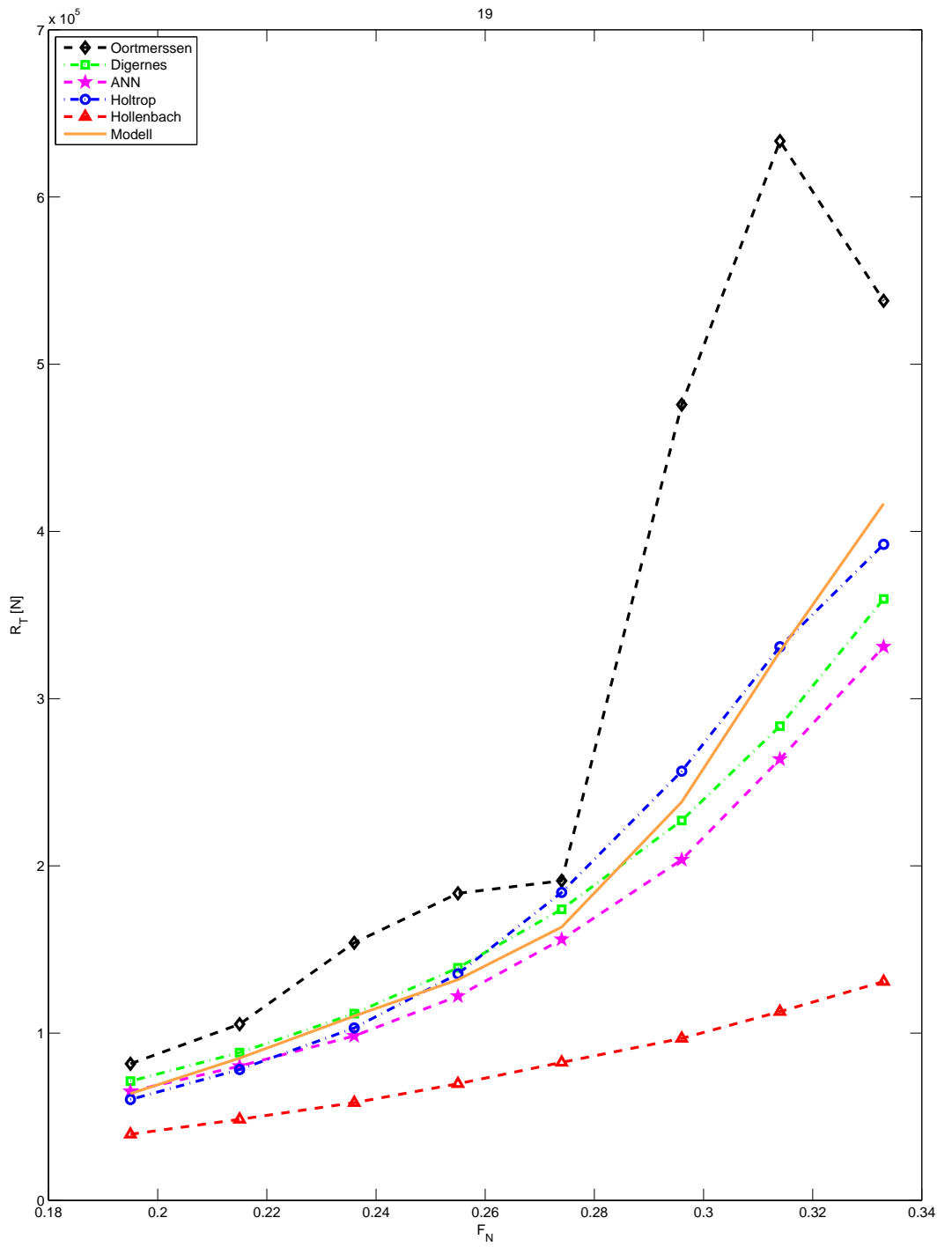


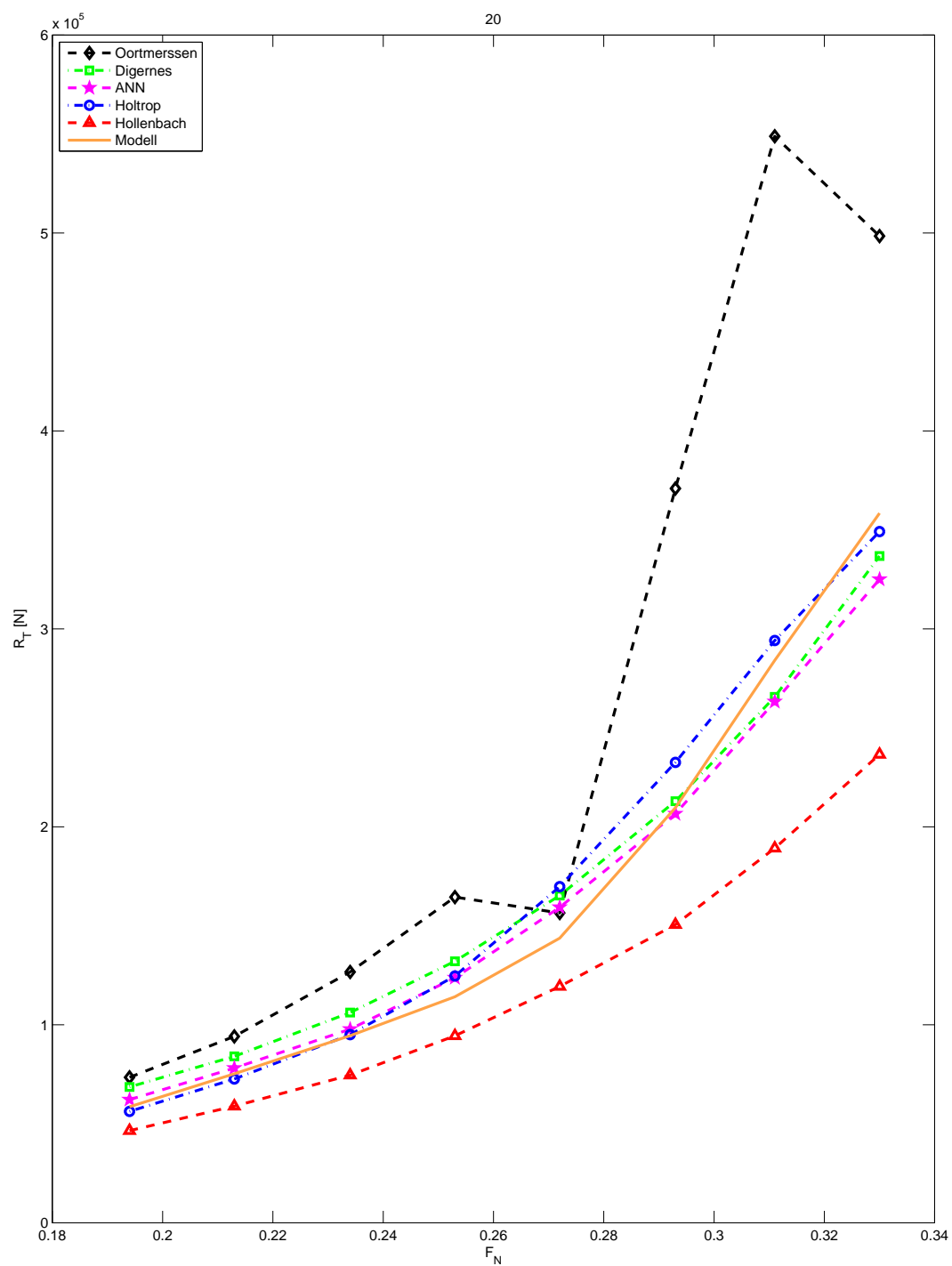


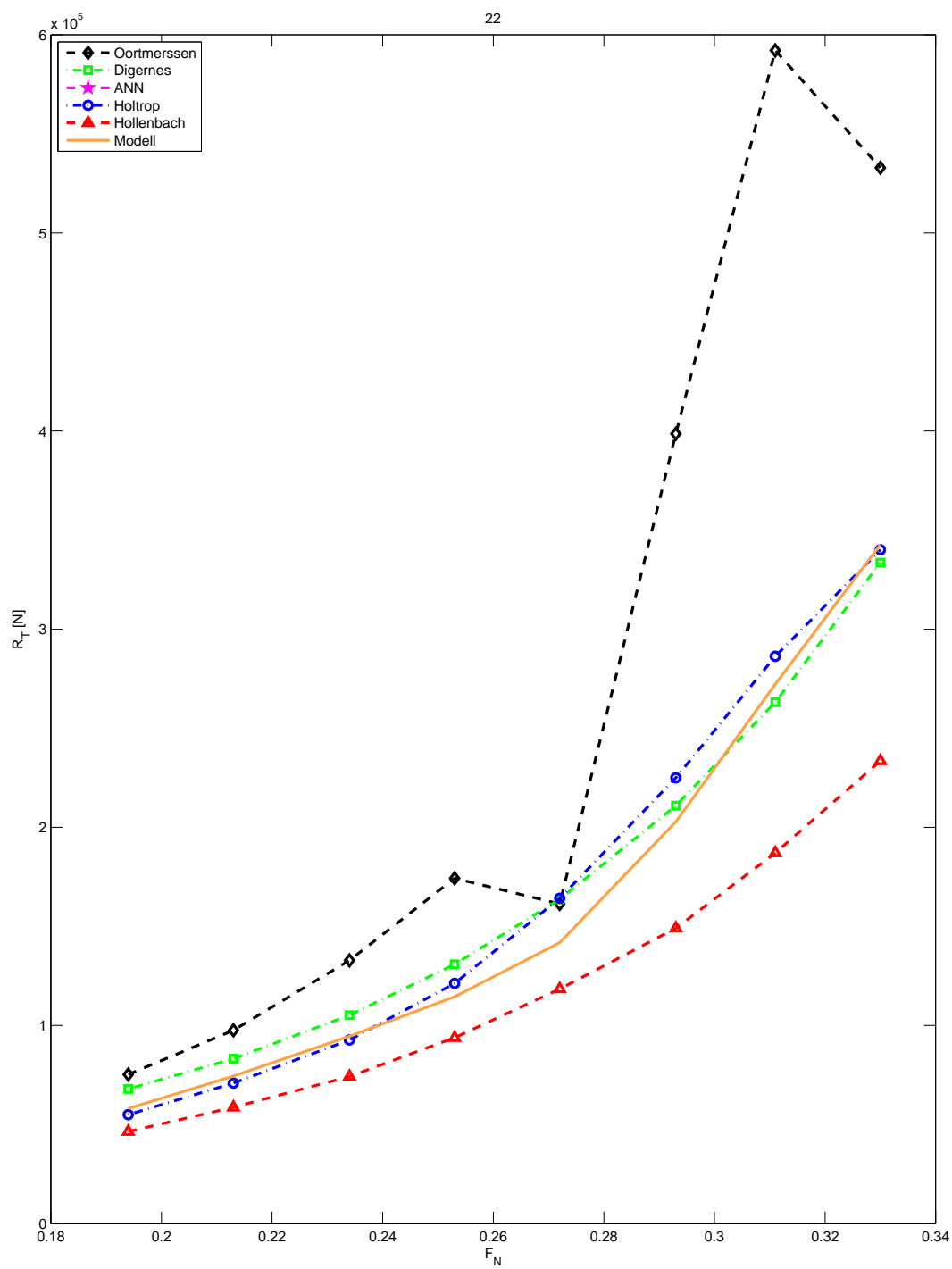


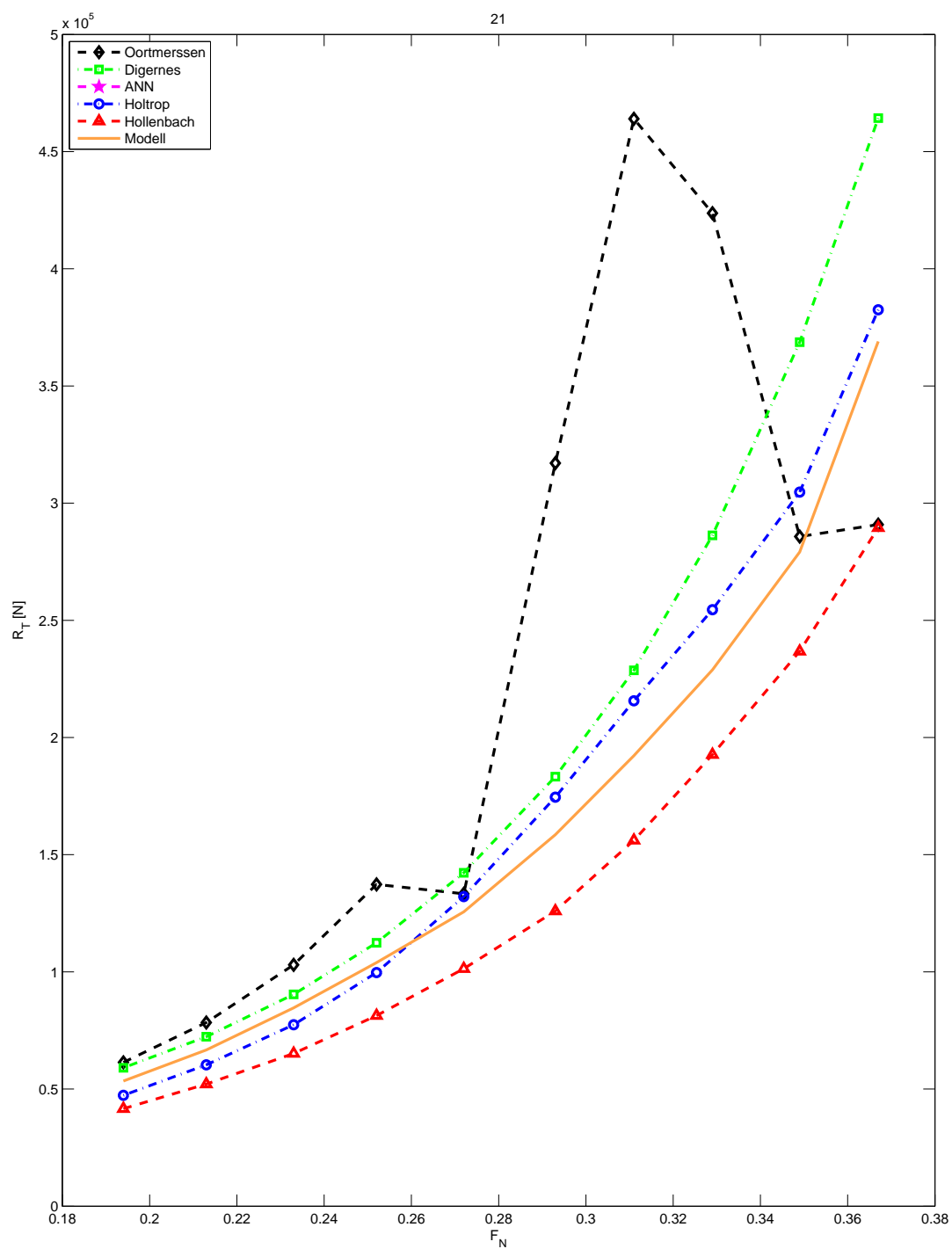
XL

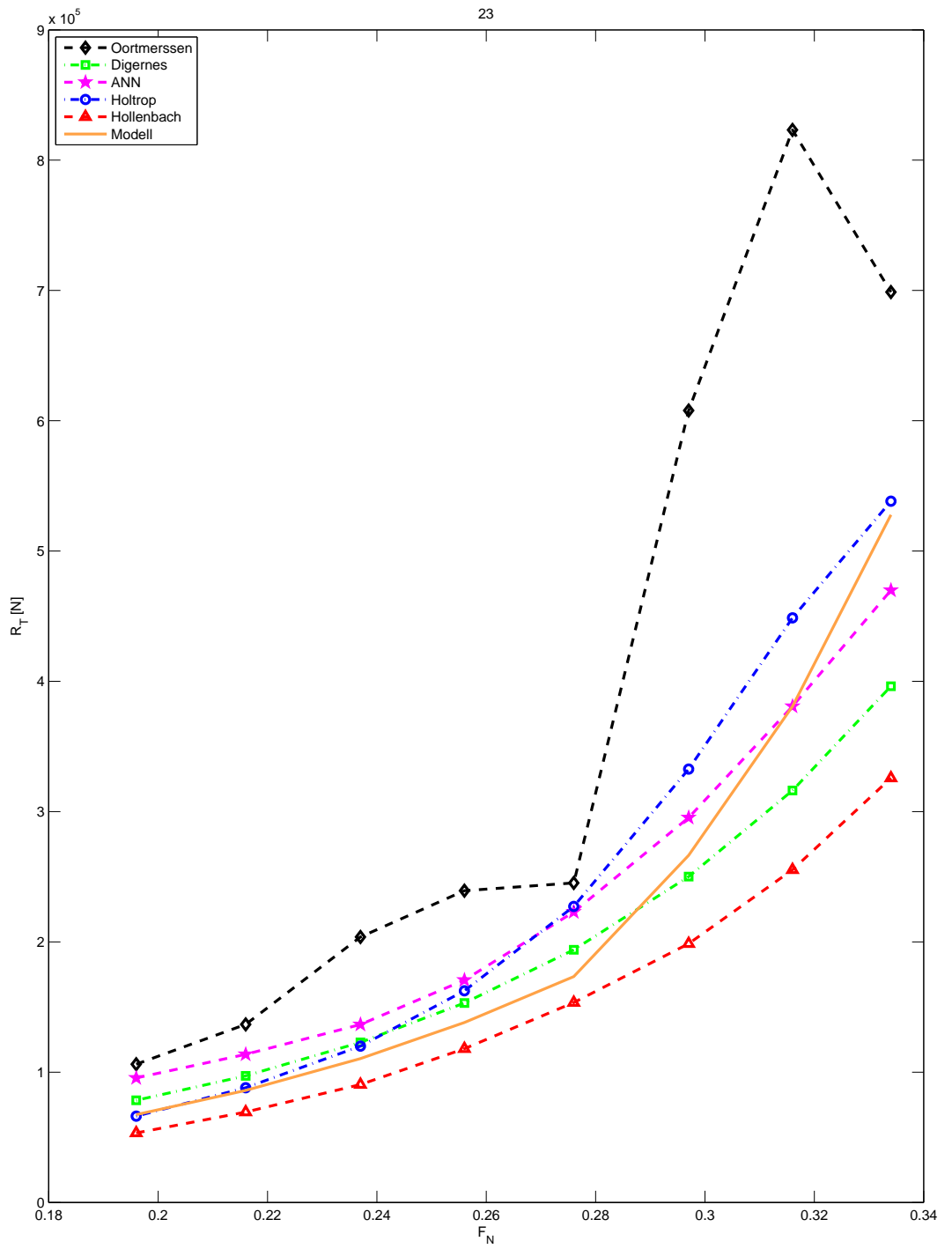


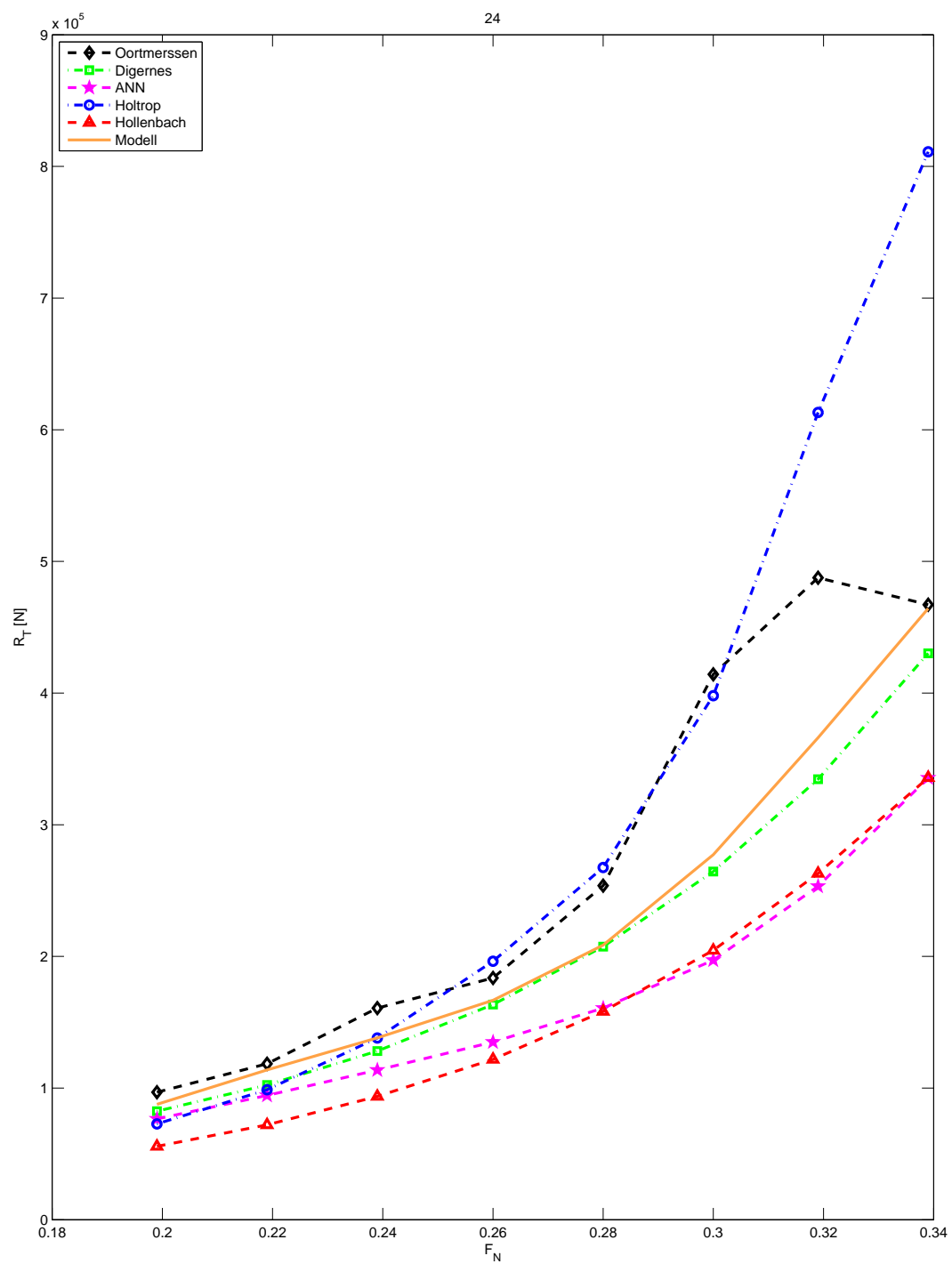


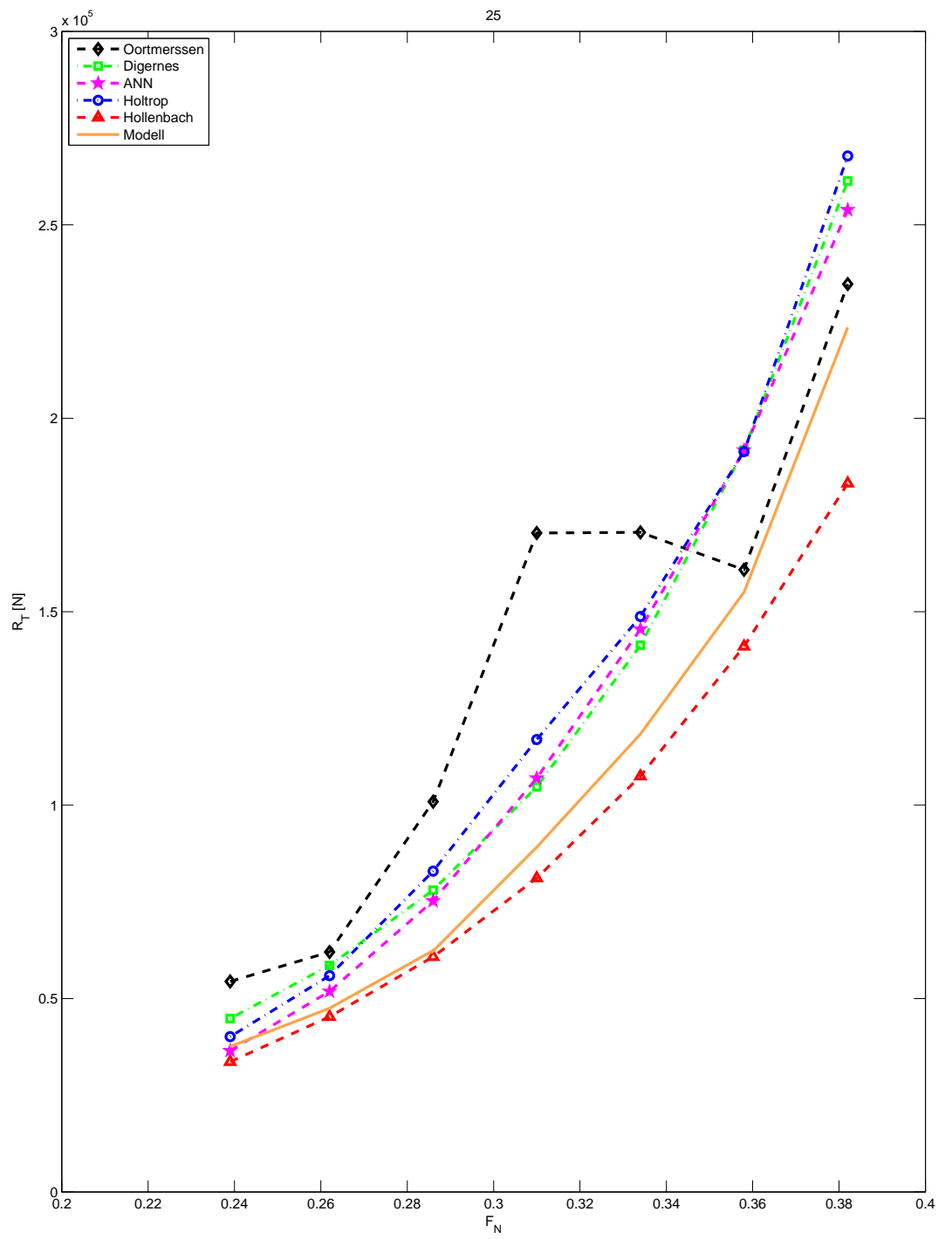


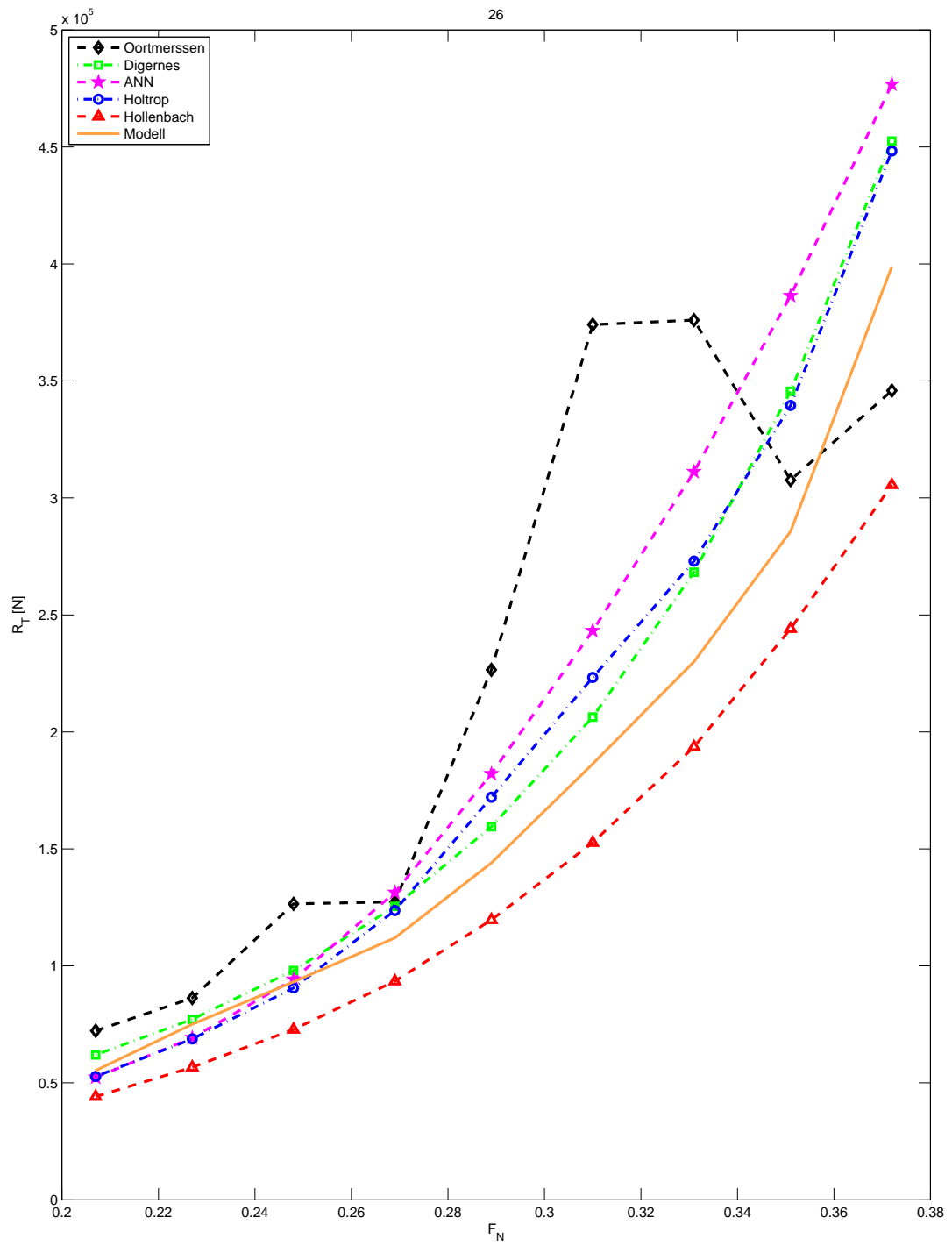


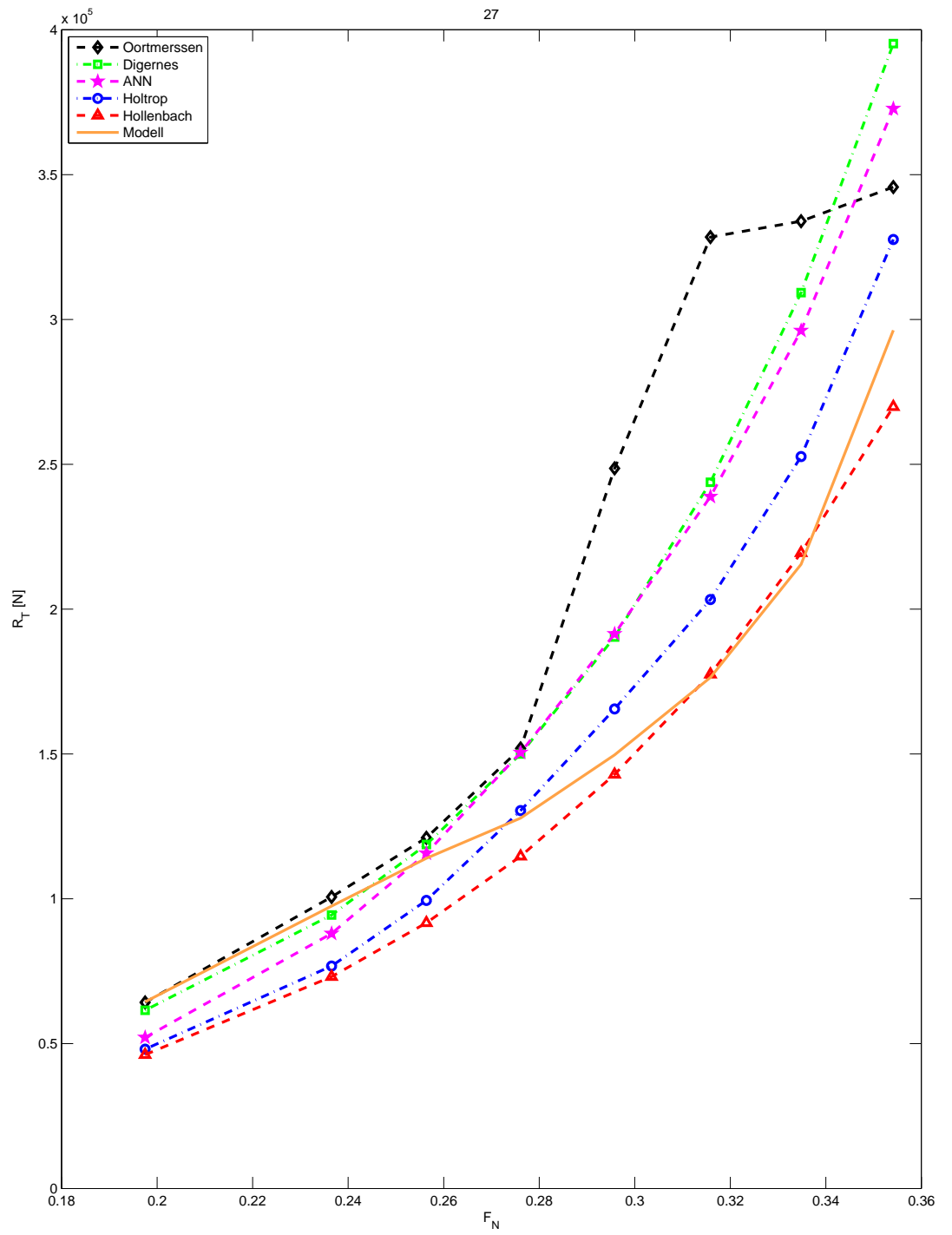




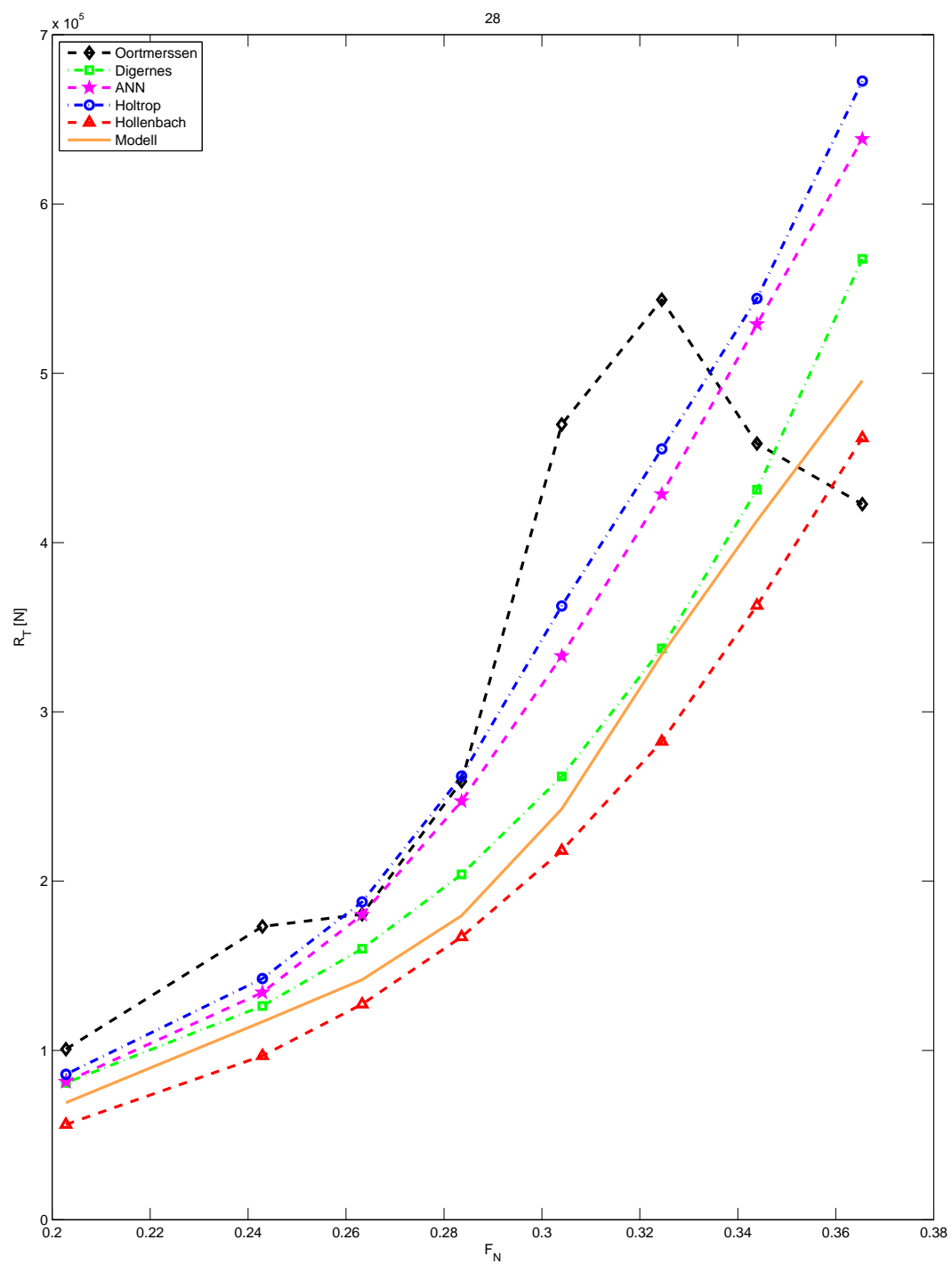


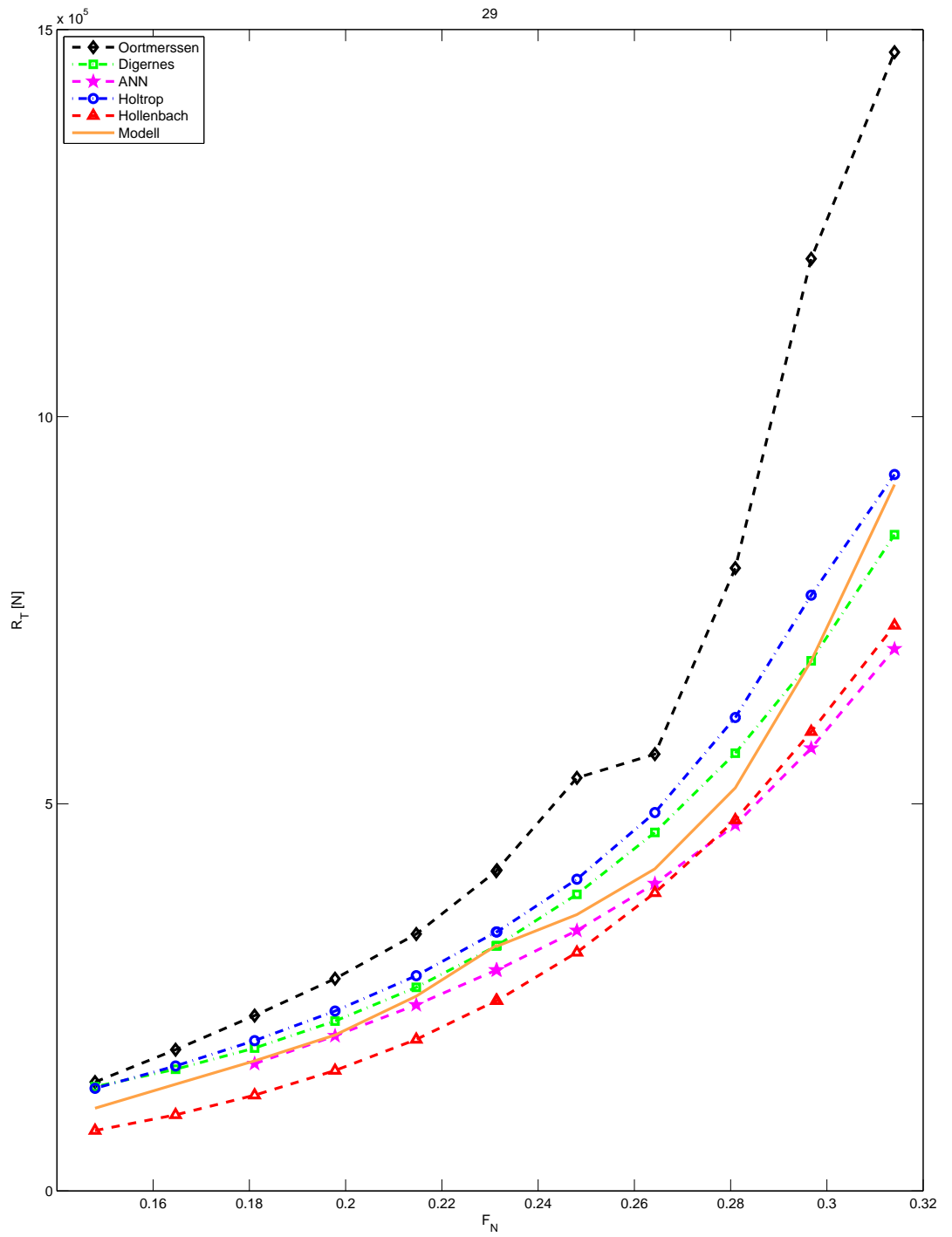


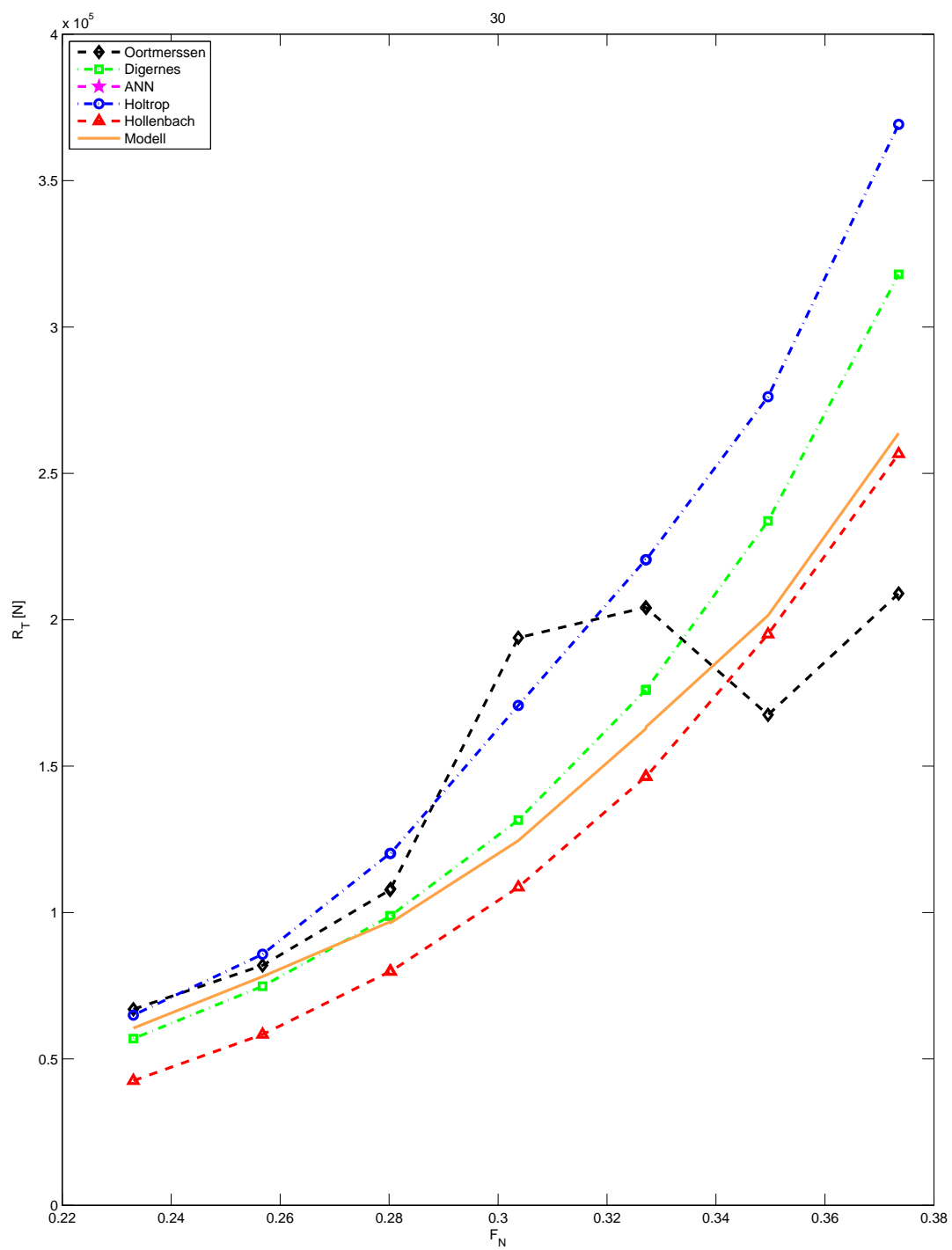


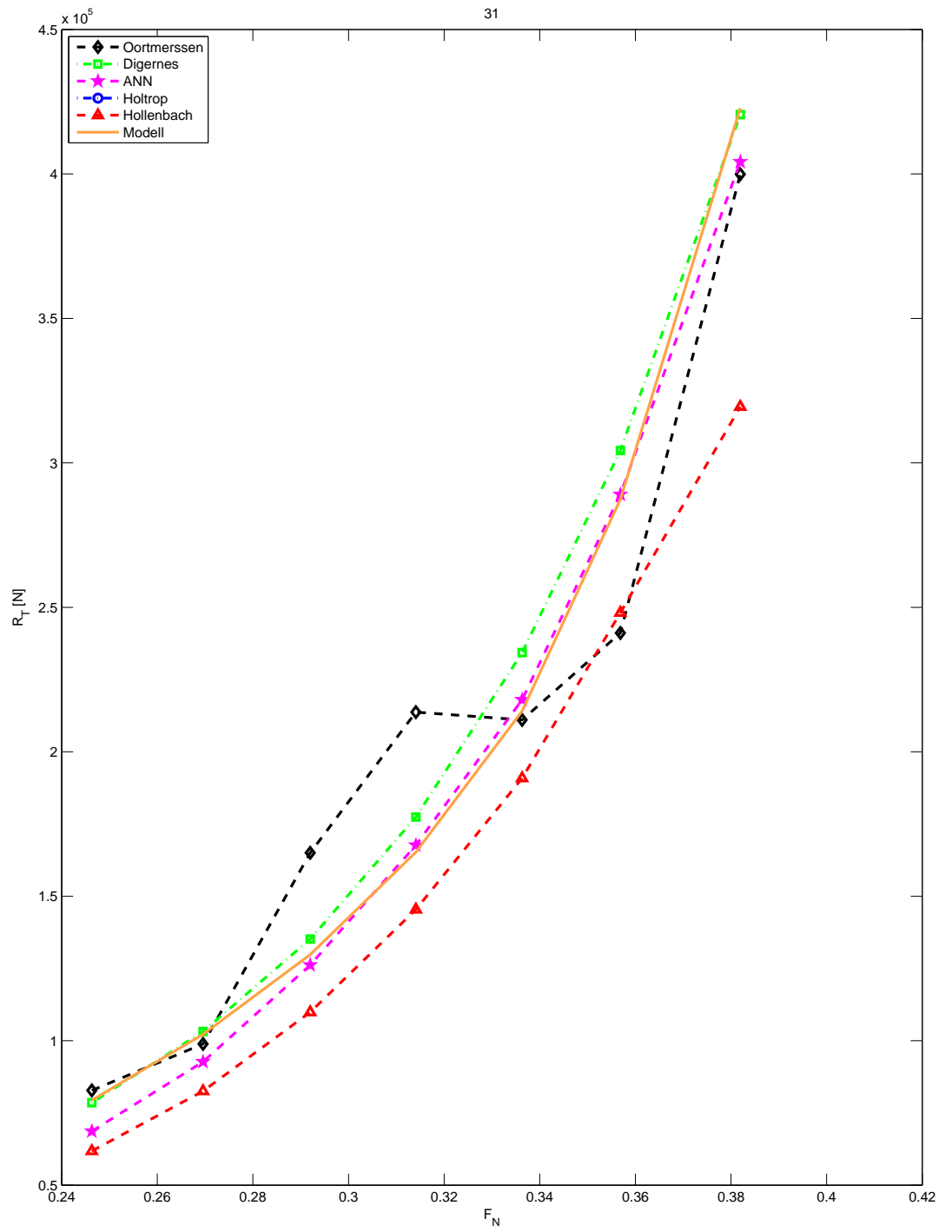


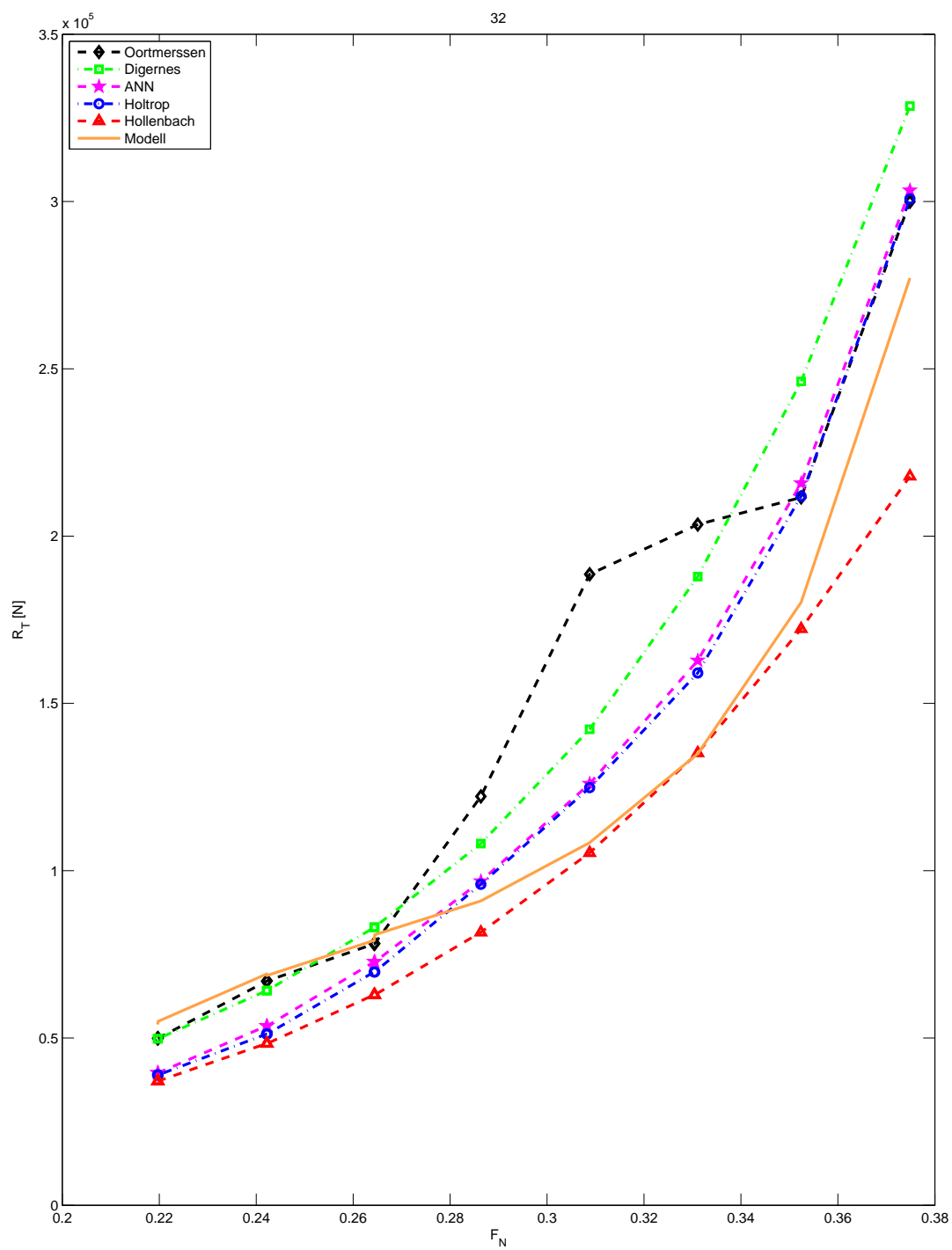
L



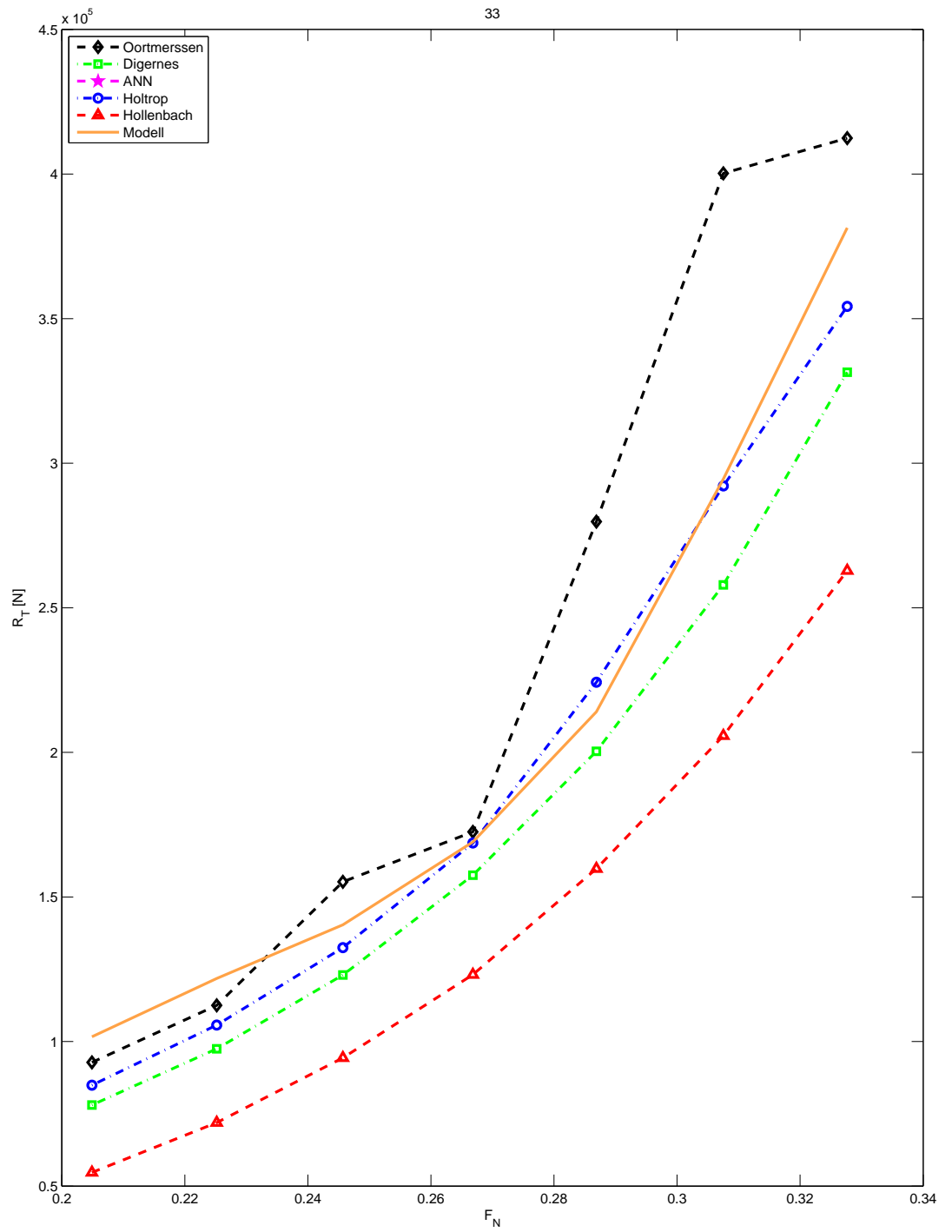


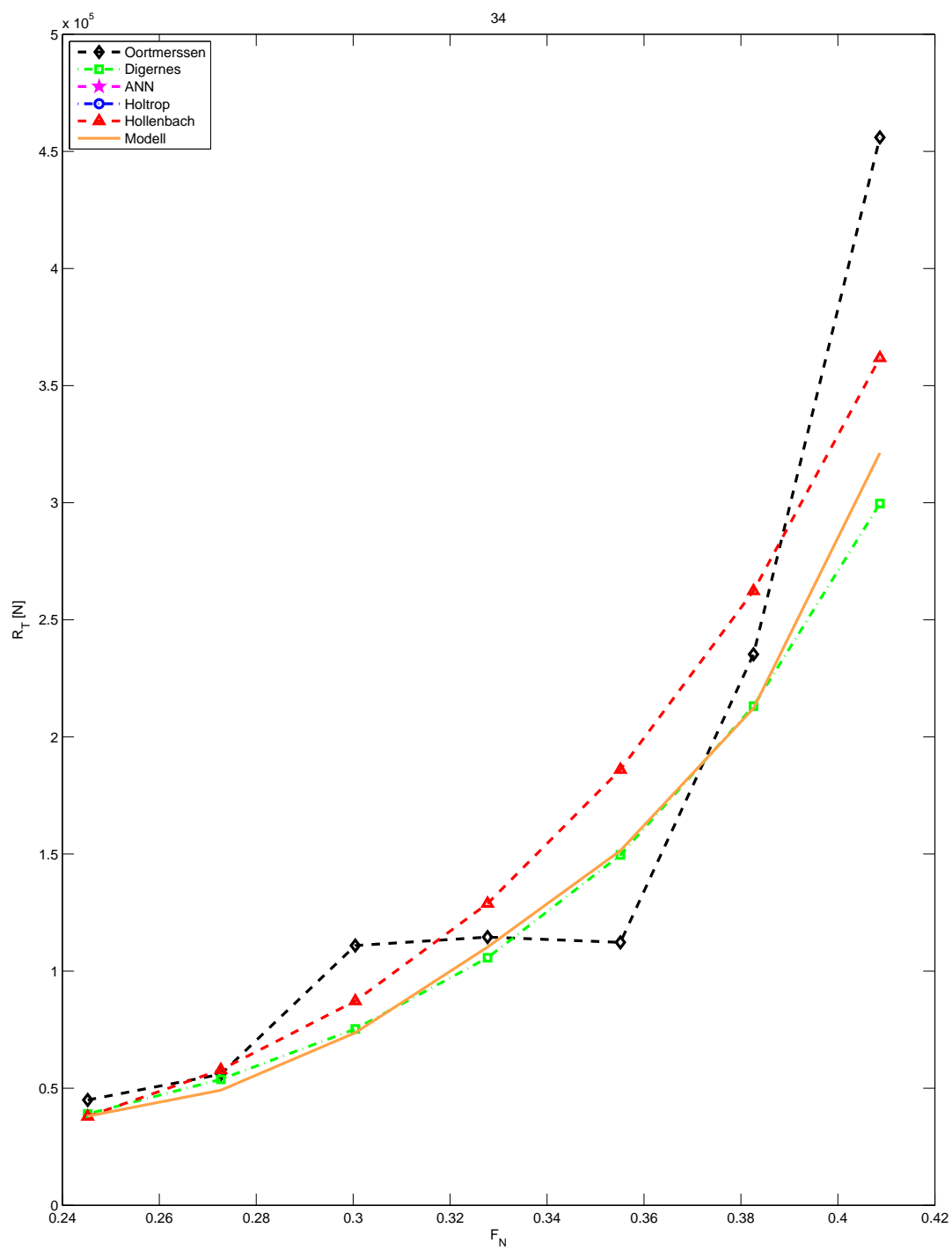


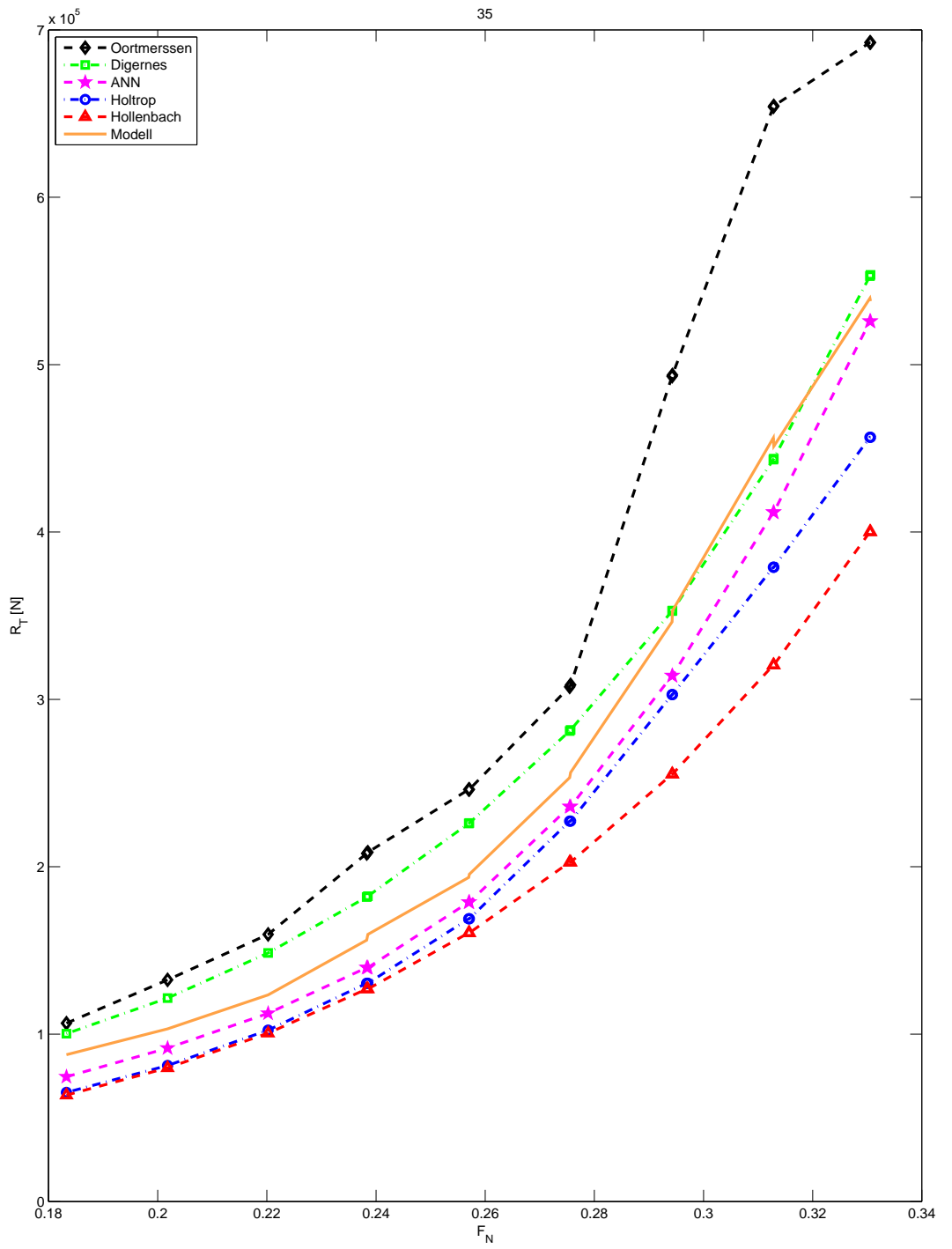


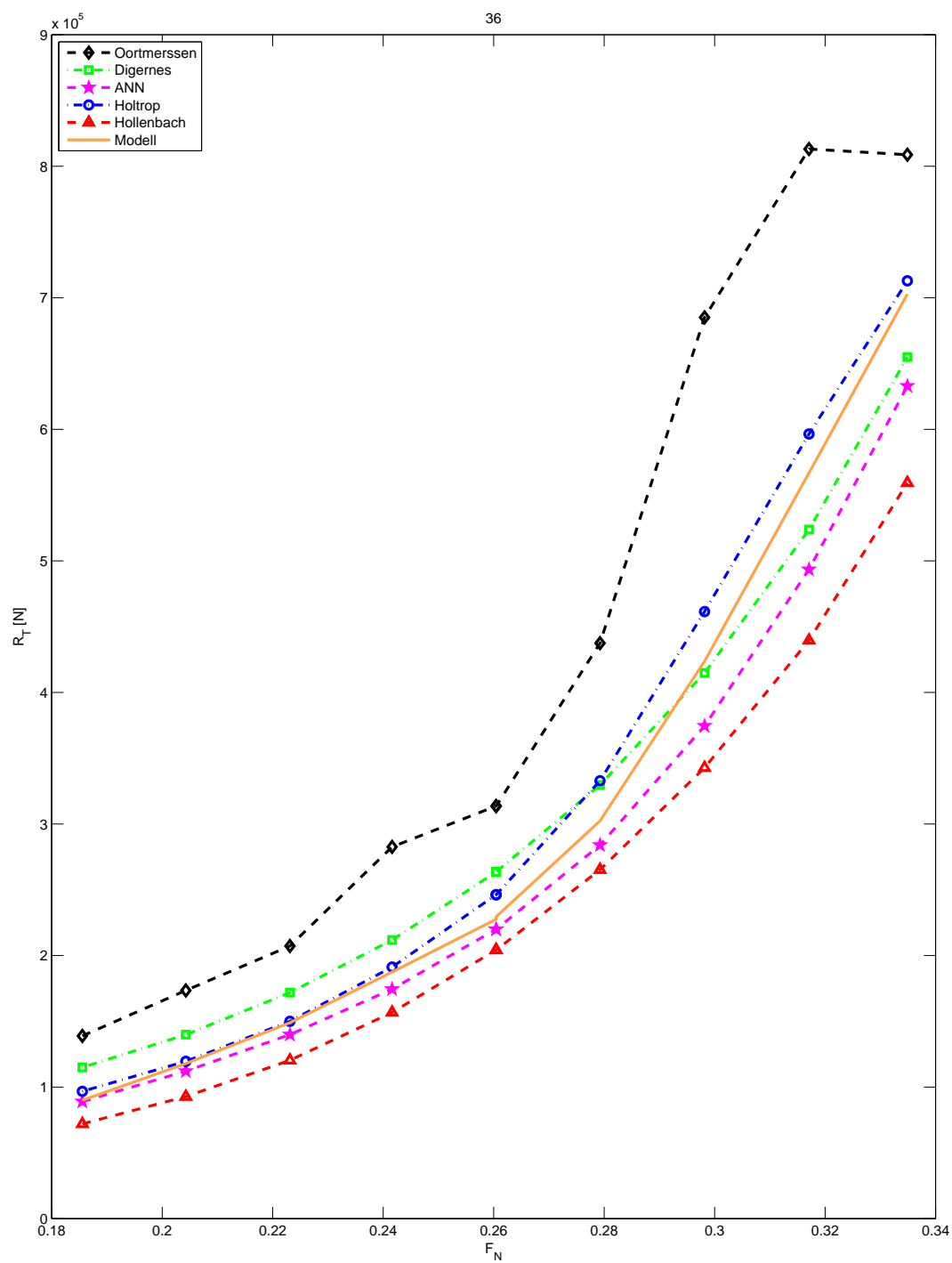


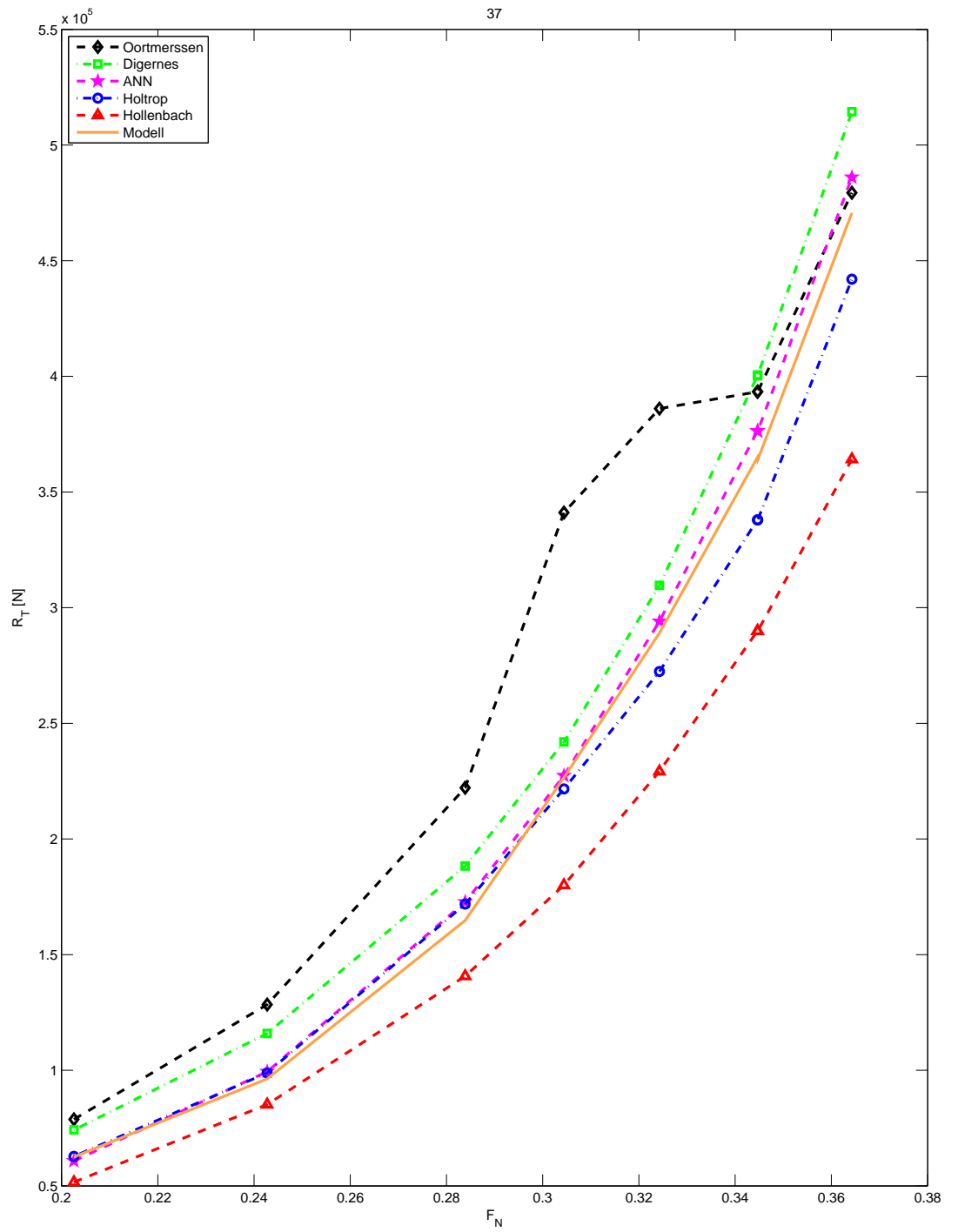
LV



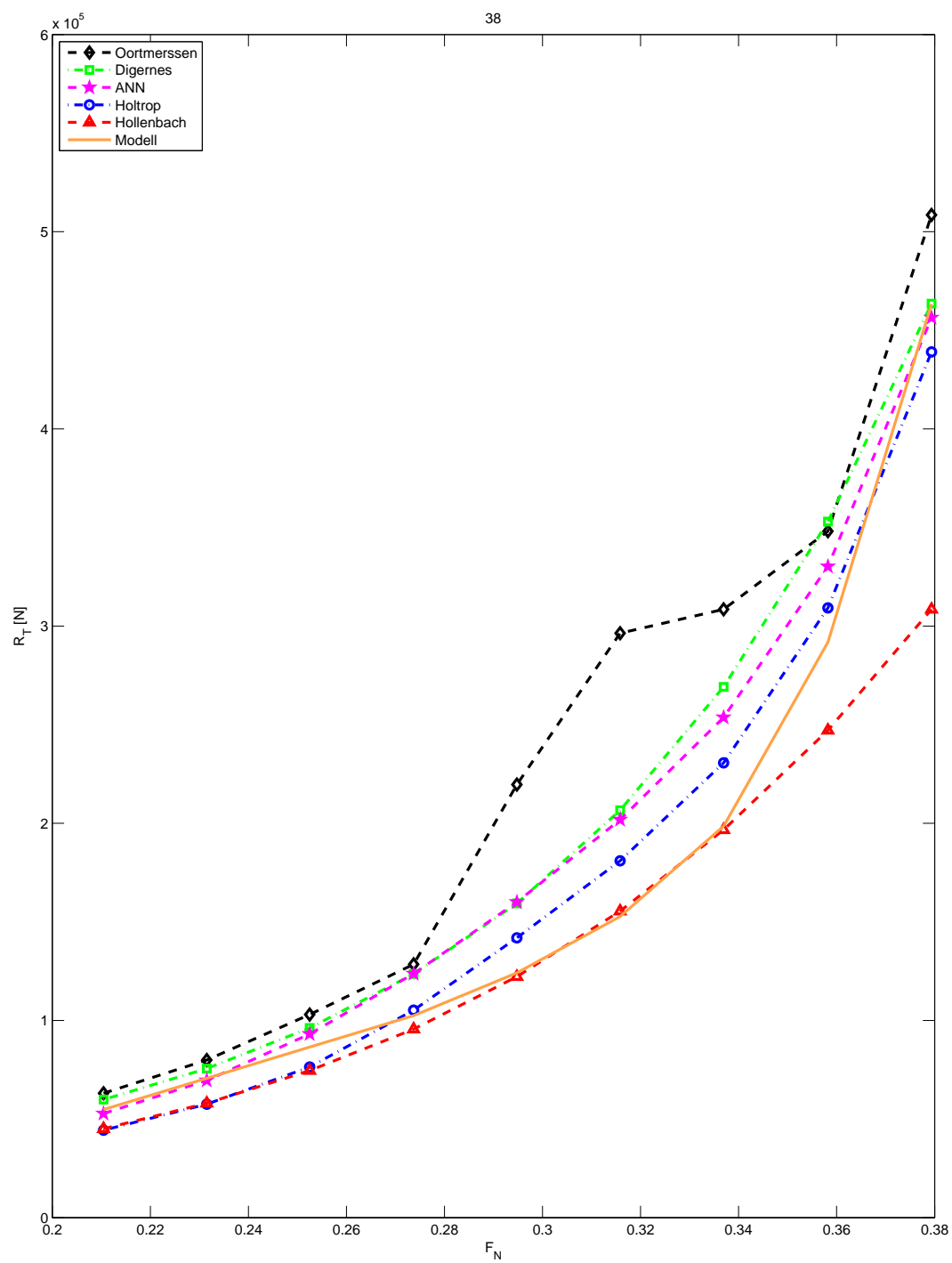


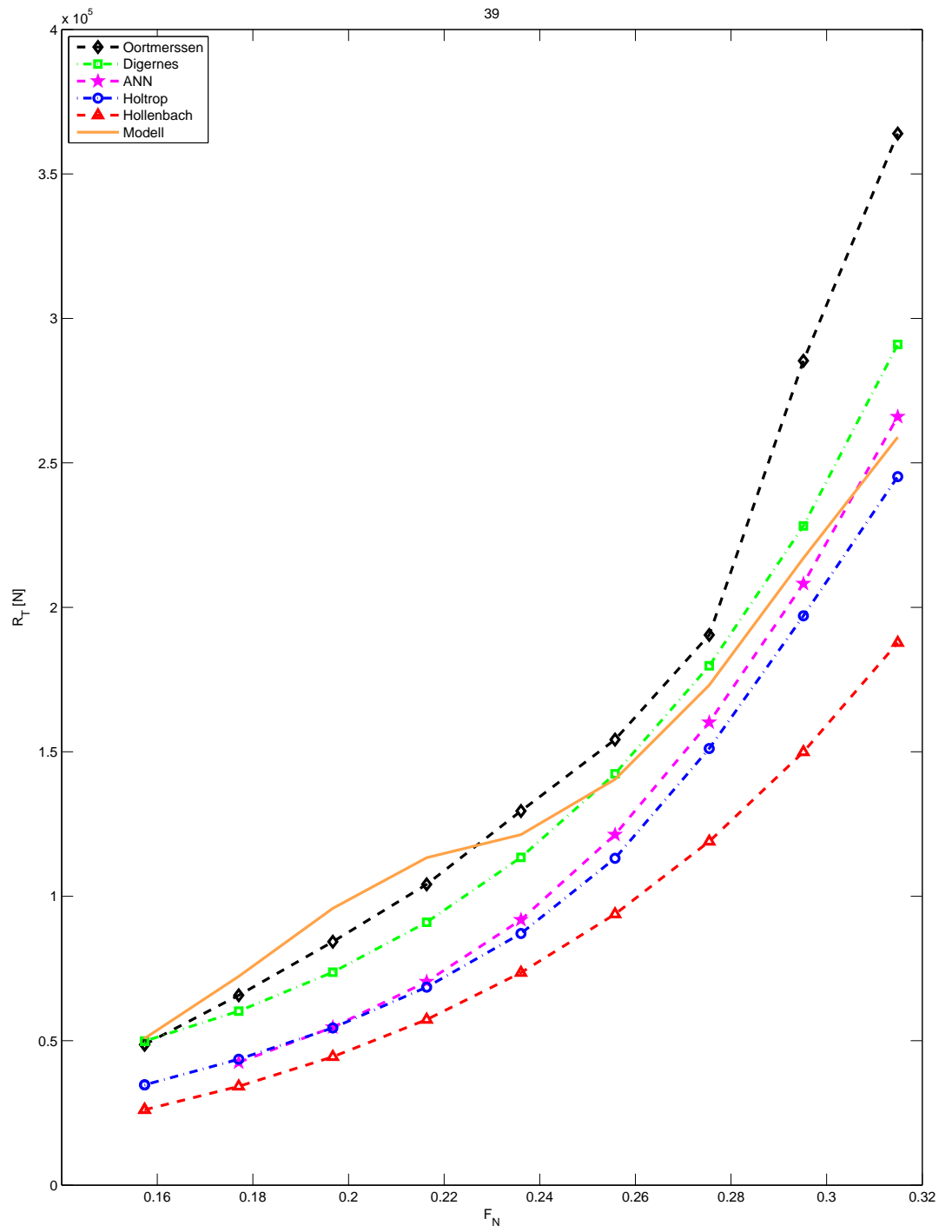


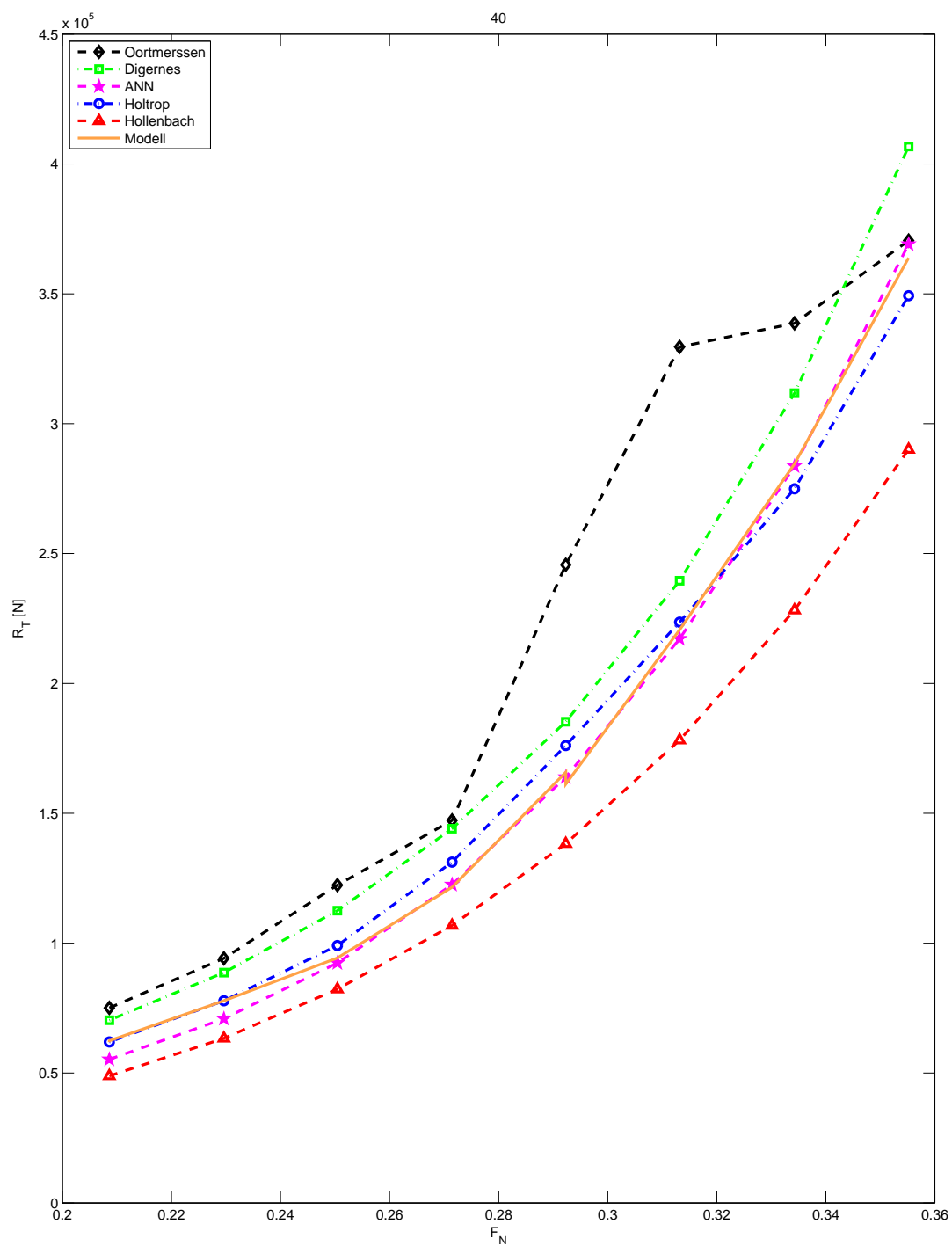


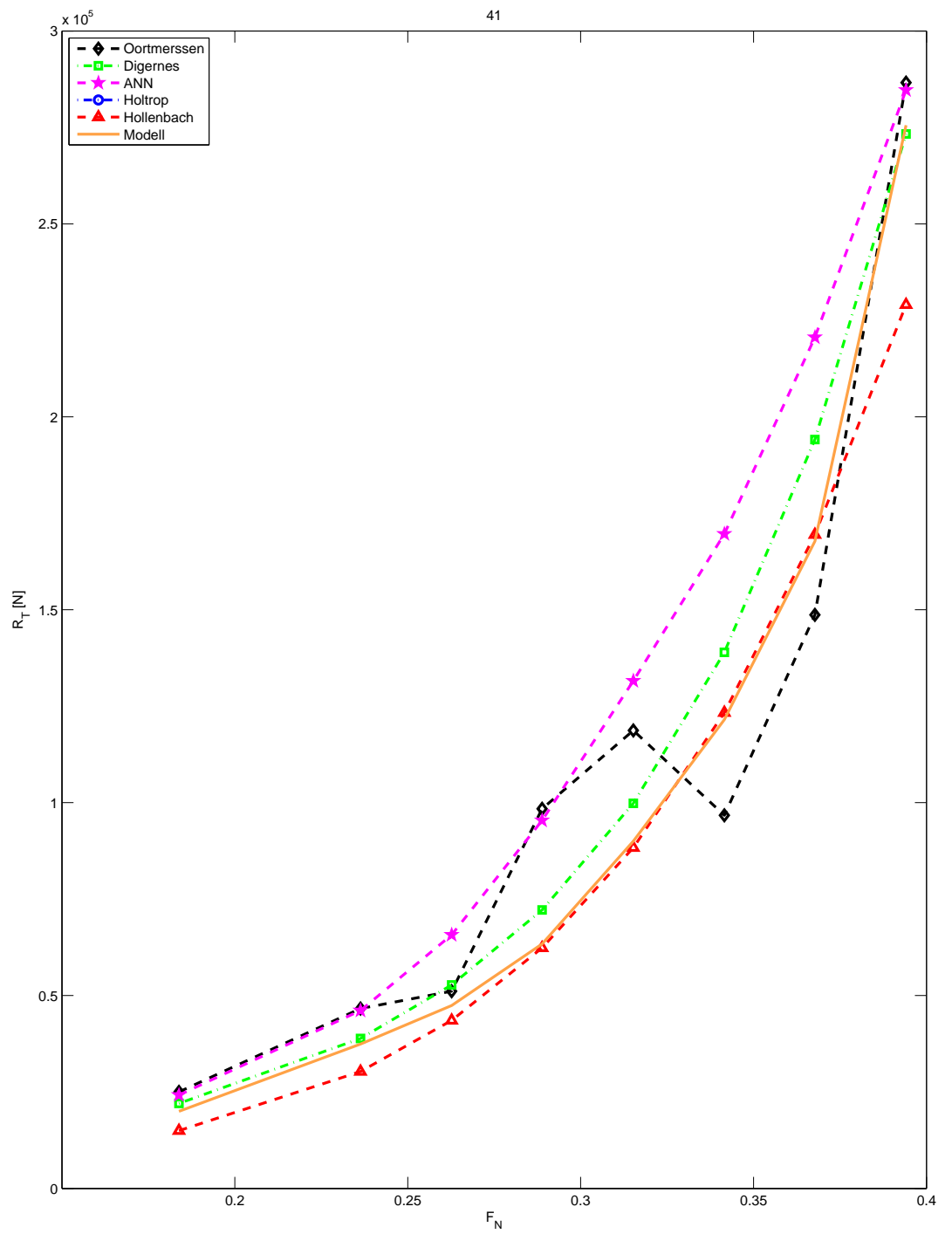


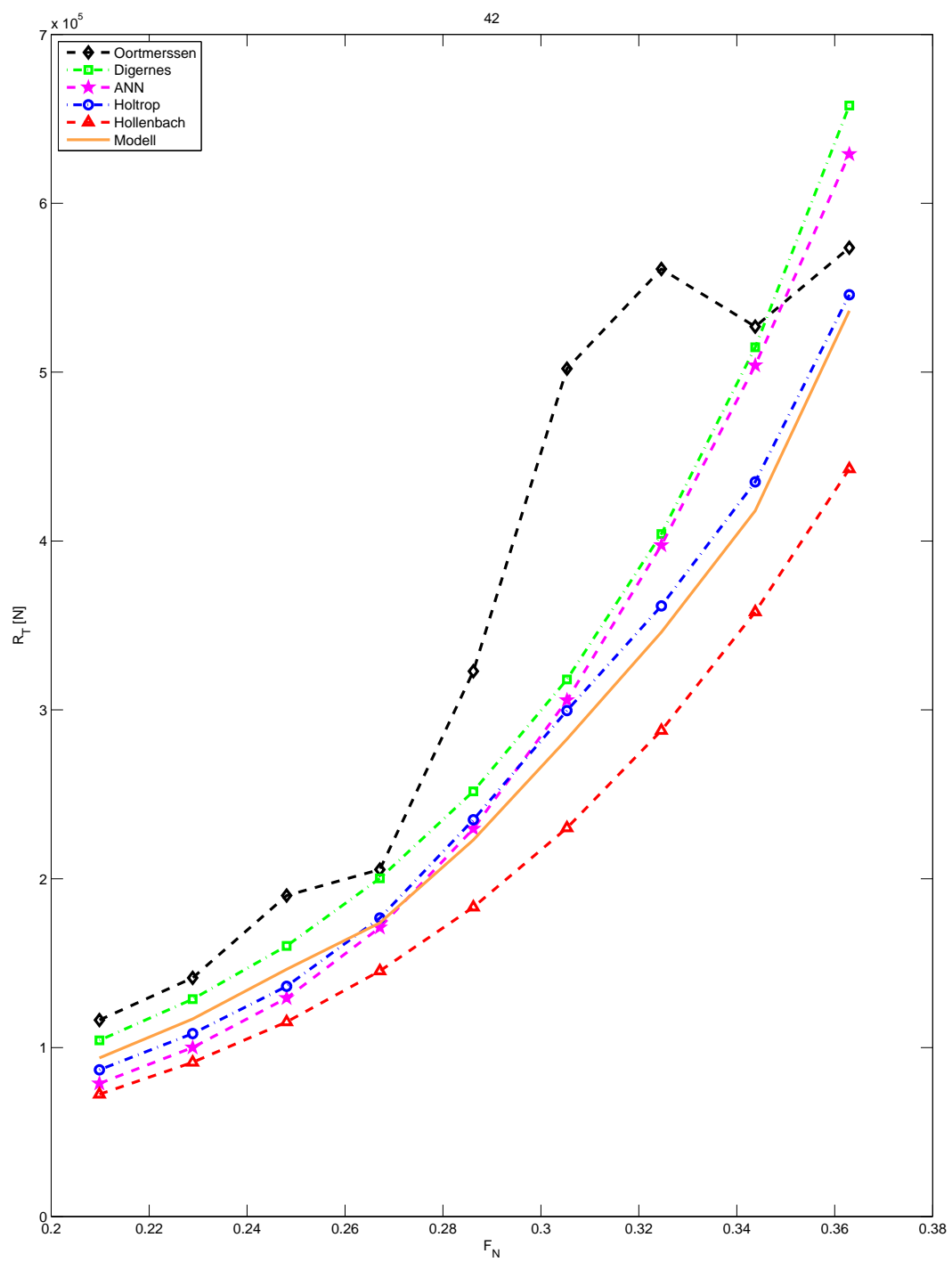
LX

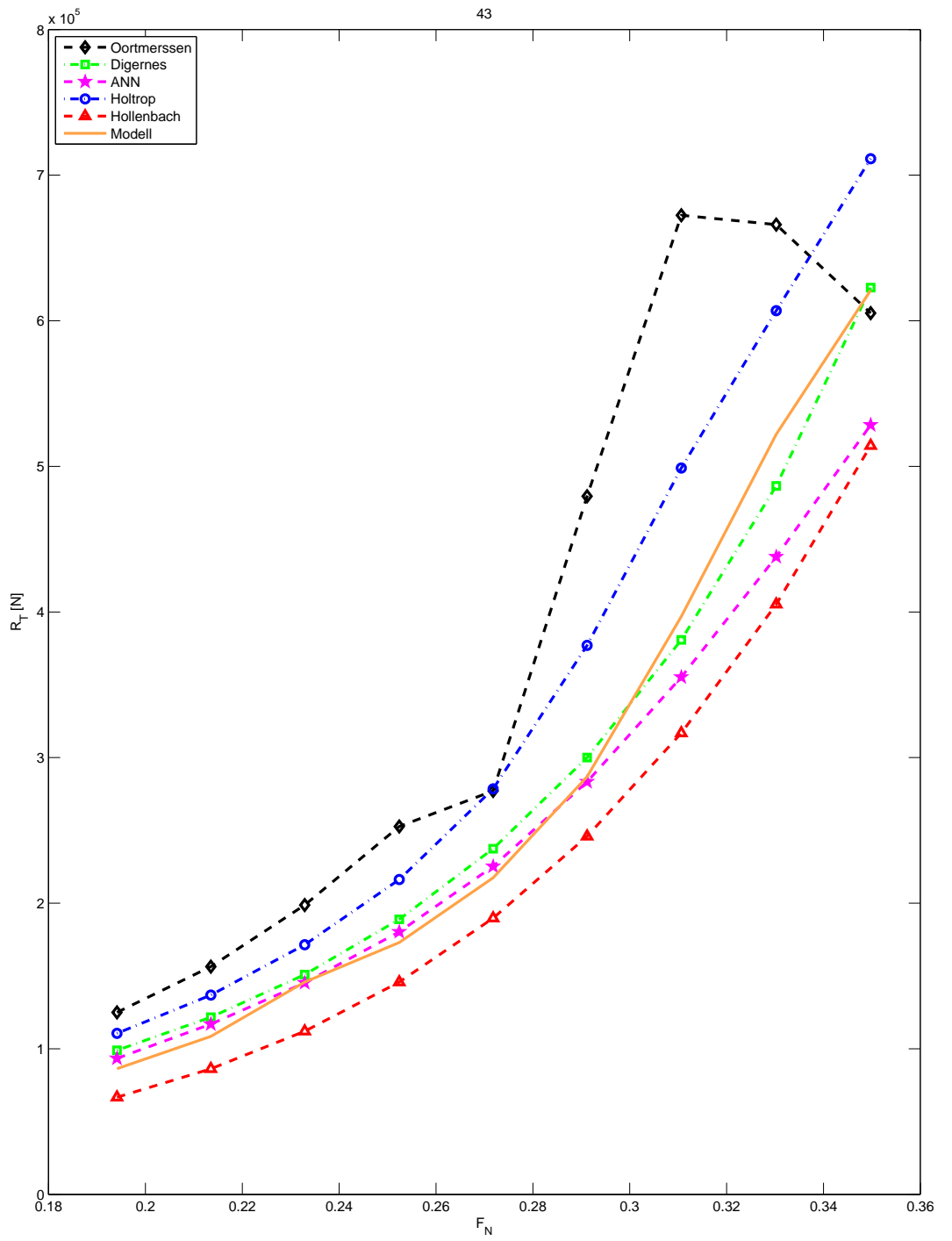


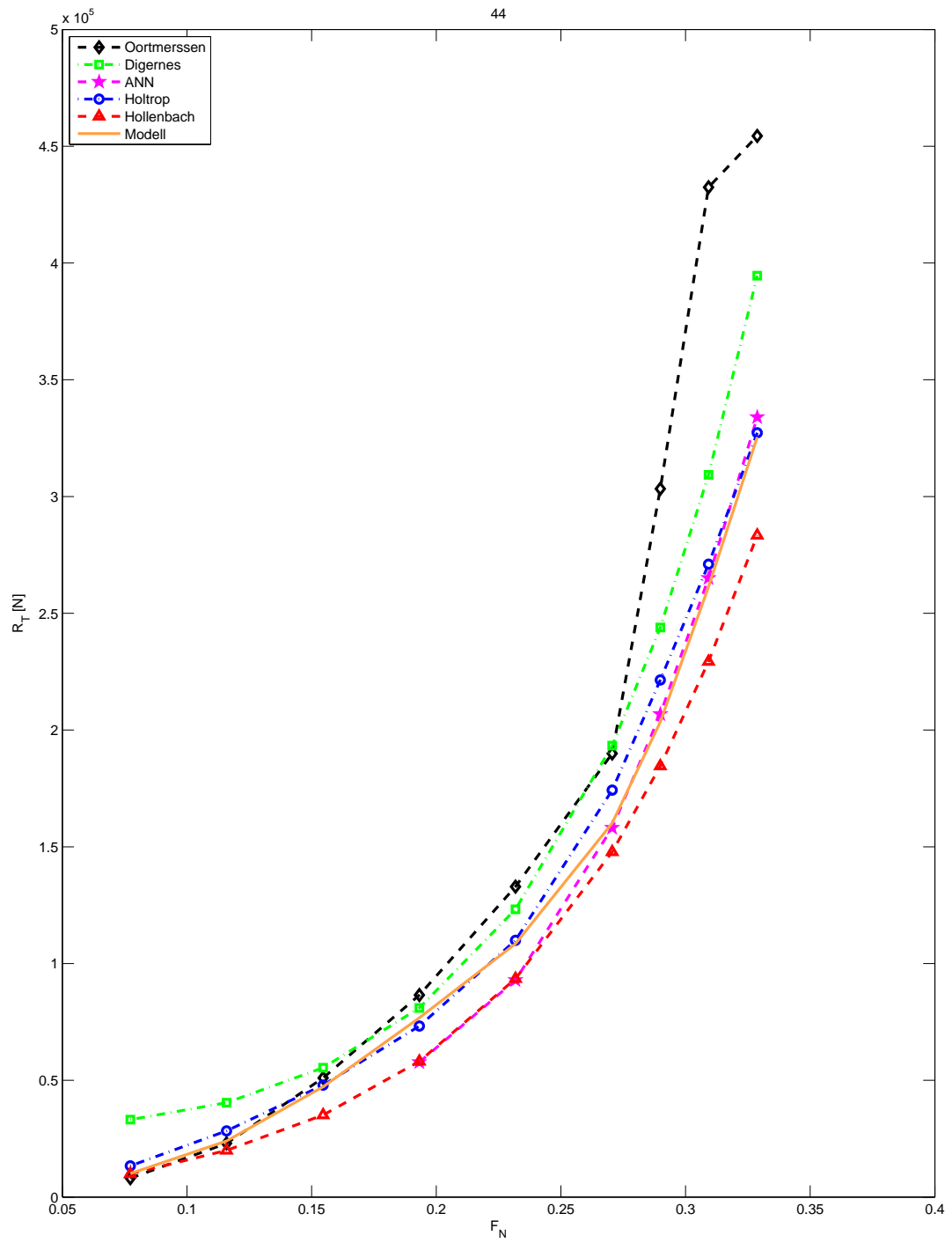


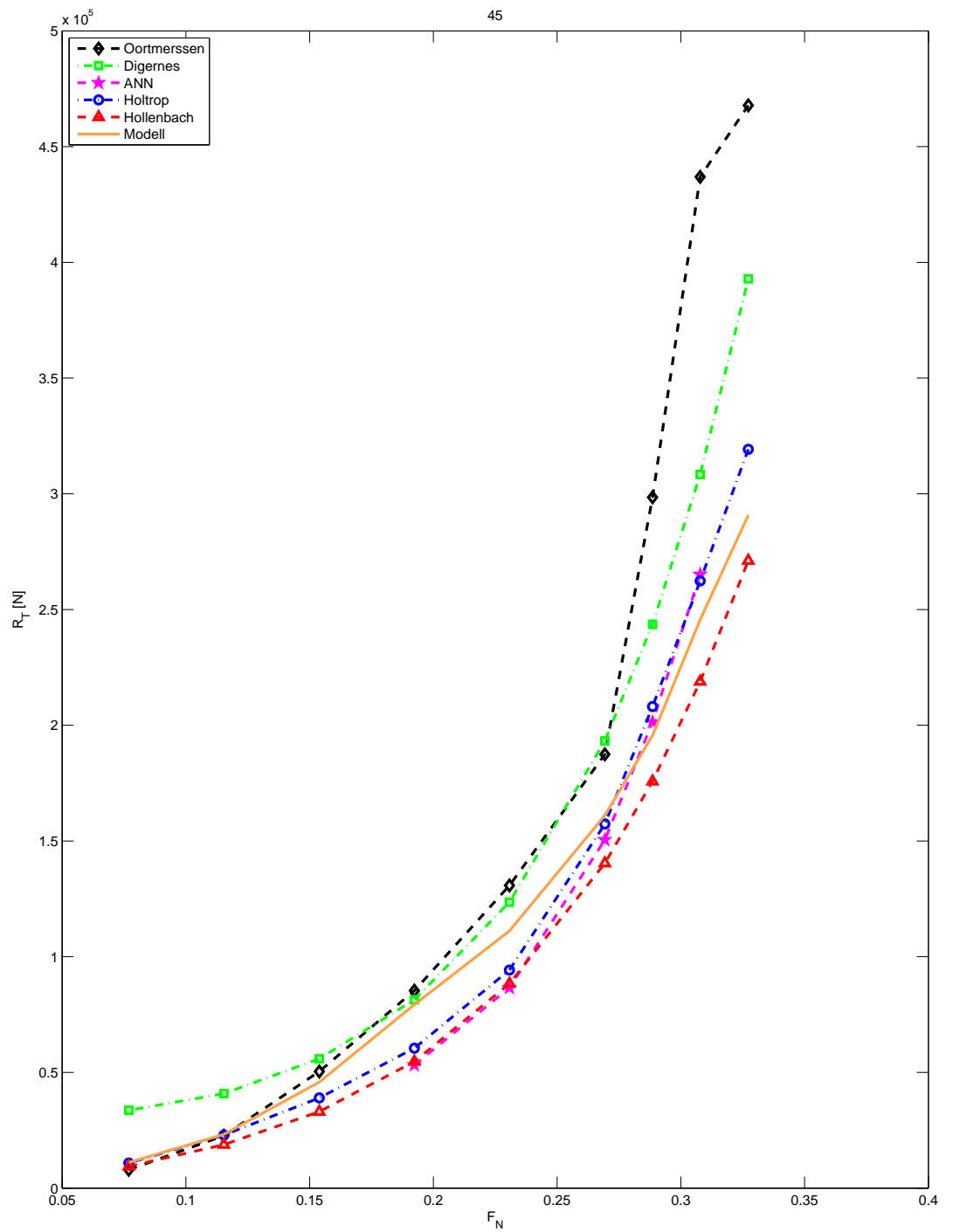


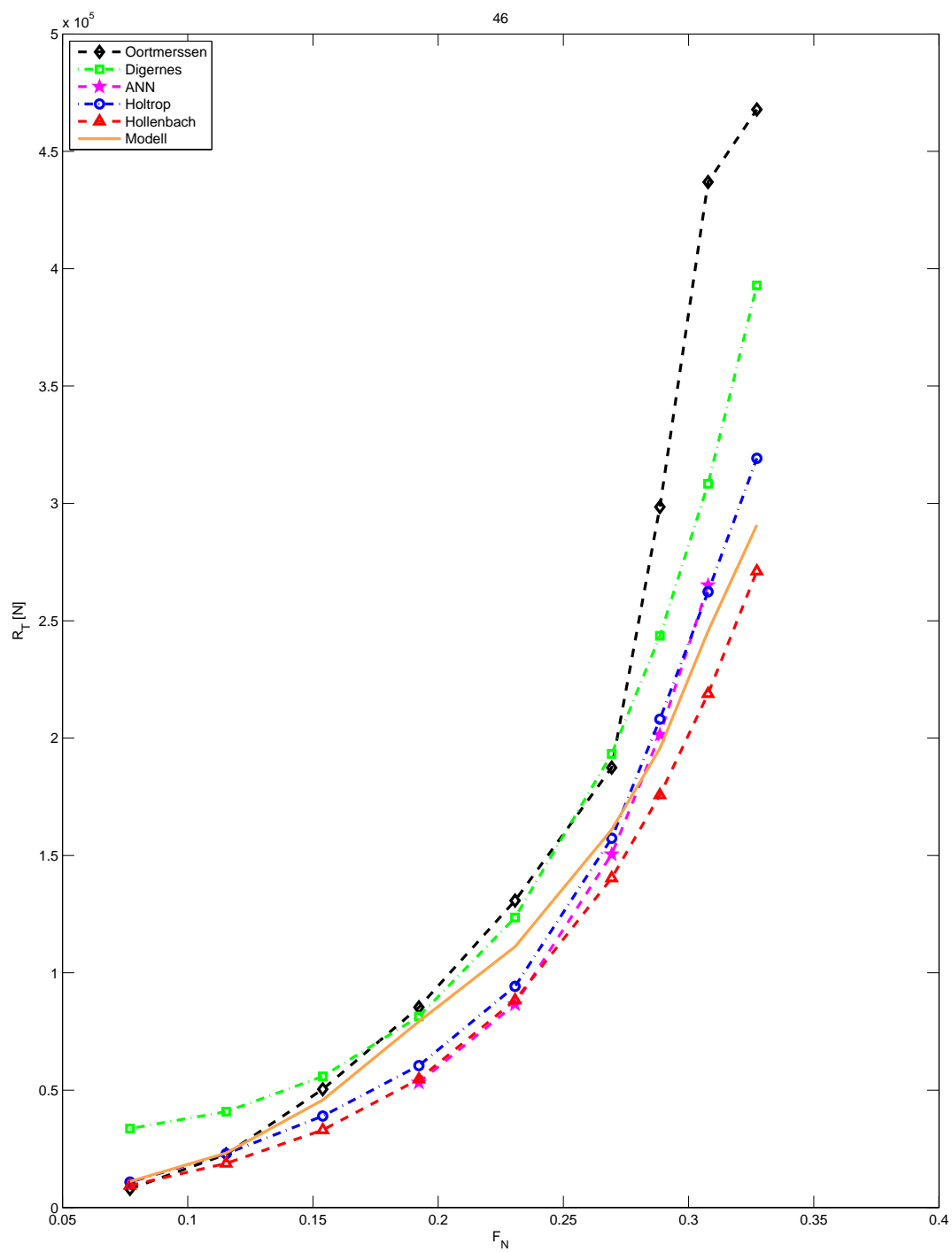


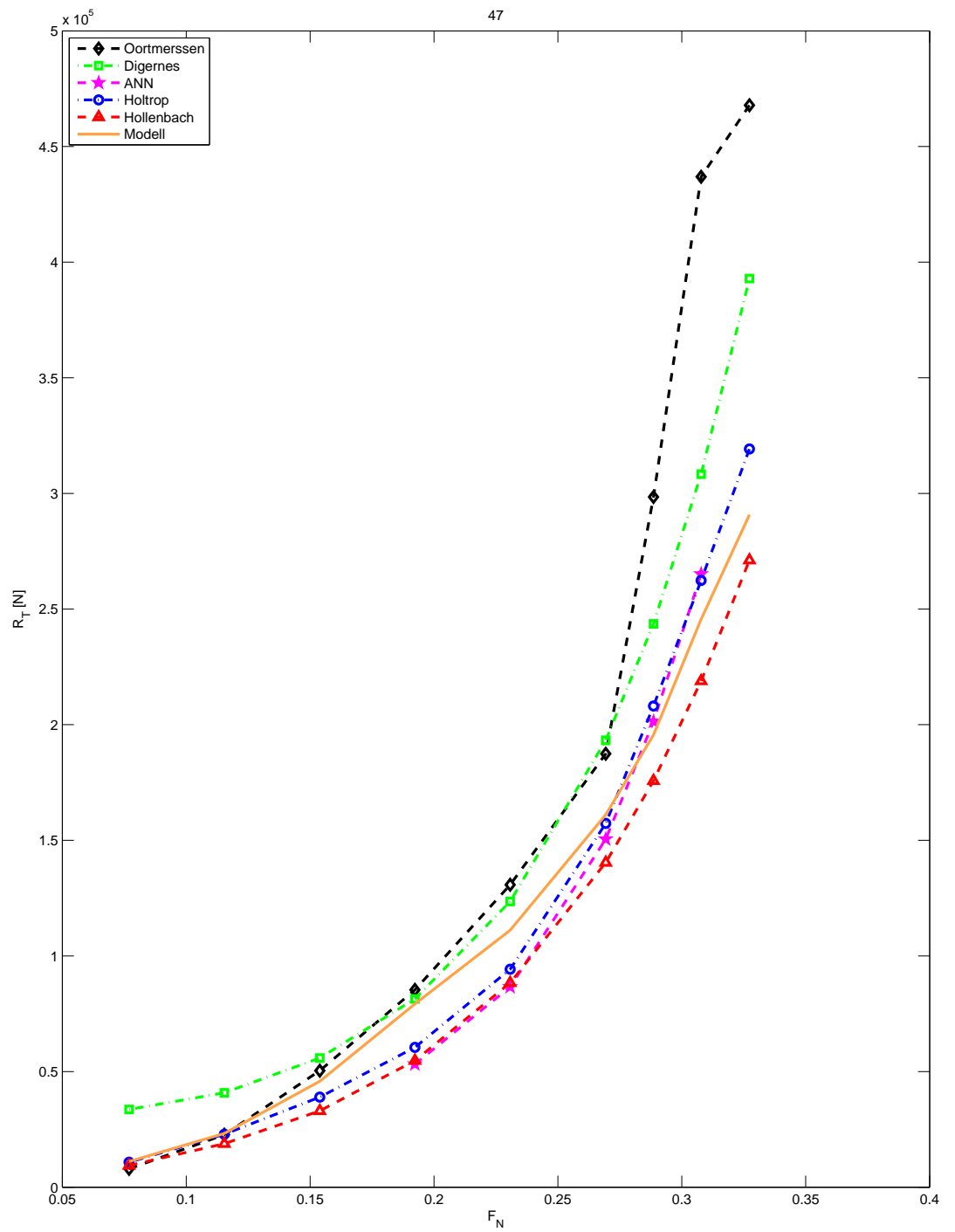




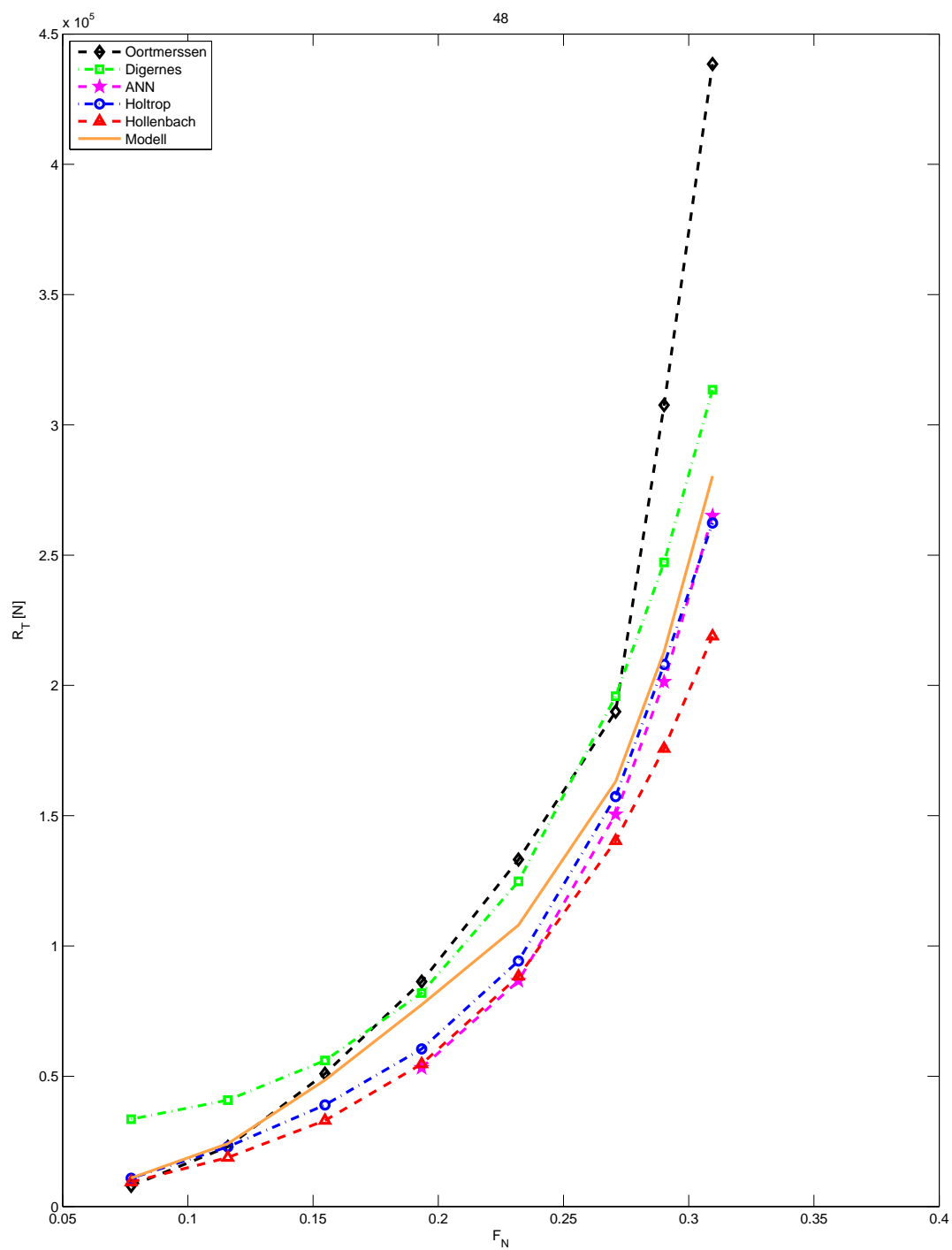








LXX



Tillegg G

Datagrunnlag

Tabell G.1: Oversikt over alle fartøy som utgjør datagrunnlaget

| Nummer | B/T | L_{VL}/B | $F_{N,min}$ | $F_{n_{N,maks}}$ | C_B | Ant. Prop |
|--------|--------|------------|-------------|------------------|--------|-----------|
| 1 | 2.0000 | 7.0000 | 0.2650 | 0.4310 | 0.5695 | 1 |
| 2 | 2.2951 | 8.2590 | 0.2620 | 0.4250 | 0.5380 | 1 |
| 3 | 2.0000 | 8.5000 | 0.2520 | 0.4030 | 0.6044 | 1 |
| 4 | 2.3810 | 10.5595 | 0.2470 | 0.3950 | 0.5623 | 1 |
| 5 | 2.5862 | 10.8103 | 0.2070 | 0.3320 | 0.6299 | 1 |
| 6 | 3.0612 | 13.2755 | 0.2040 | 0.3460 | 0.5963 | 1 |
| 7 | 2.2857 | 7.0000 | 0.2650 | 0.4310 | 0.5716 | 1 |
| 8 | 2.6230 | 8.2590 | 0.2620 | 0.4250 | 0.5399 | 1 |
| 9 | 2.0000 | 7.0000 | 0.2650 | 0.4310 | 0.6584 | 1 |
| 10 | 2.2951 | 8.2590 | 0.2620 | 0.4250 | 0.6207 | 1 |
| 11 | 2.2000 | 8.5000 | 0.2520 | 0.4030 | 0.6005 | 1 |
| 12 | 2.6190 | 10.5595 | 0.2470 | 0.3950 | 0.5582 | 1 |
| 13 | 2.7800 | 8.5000 | 0.2390 | 0.4030 | 0.6052 | 1 |
| 14 | 3.3095 | 10.5595 | 0.2340 | 0.3950 | 0.5621 | 1 |
| 15 | 2.5862 | 10.8103 | 0.1890 | 0.3190 | 0.6791 | 1 |
| 16 | 3.0612 | 13.2755 | 0.1930 | 0.3260 | 0.6475 | 1 |
| 17 | 2.2857 | 7.0000 | 0.2490 | 0.4320 | 0.6572 | 1 |
| 18 | 2.6230 | 8.2590 | 0.2460 | 0.4260 | 0.6273 | 1 |
| 19 | 2.1138 | 11.4179 | 0.1950 | 0.3330 | 0.6513 | 1 |
| 20 | 2.1138 | 11.5924 | 0.1940 | 0.3300 | 0.6326 | 1 |
| 21 | 2.6531 | 14.5857 | 0.1940 | 0.3670 | 0.5956 | 1 |
| 22 | 2.1138 | 11.5924 | 0.1940 | 0.3300 | 0.6273 | 1 |
| 23 | 1.7450 | 9.3083 | 0.1960 | 0.3340 | 0.6617 | 1 |
| 24 | 2.6500 | 11.2800 | 0.1990 | 0.3390 | 0.6376 | 1 |
| 25 | 2.3913 | 10.2861 | 0.2390 | 0.3820 | 0.6047 | 1 |
| 26 | 2.1667 | 10.4990 | 0.2070 | 0.3720 | 0.6082 | 1 |
| 27 | 2.7170 | 13.0603 | 0.1975 | 0.3541 | 0.5637 | 1 |
| 28 | 2.0000 | 9.1044 | 0.2028 | 0.3654 | 0.6284 | 1 |
| 29 | 3.0000 | 14.0965 | 0.1479 | 0.3141 | 0.6986 | 2 |
| 30 | 2.1754 | 8.6481 | 0.2331 | 0.3735 | 0.6247 | 1 |
| 31 | 2.5926 | 9.8925 | 0.2463 | 0.3819 | 0.6056 | 1 |
| 32 | 2.6122 | 11.3279 | 0.2196 | 0.3748 | 0.5723 | 1 |
| 33 | 2.7273 | 11.7070 | 0.2049 | 0.3277 | 0.6732 | 2 |
| 34 | 2.1429 | 6.4387 | 0.2452 | 0.4087 | 0.5403 | 1 |
| 35 | 3.0667 | 13.3338 | 0.1833 | 0.3306 | 0.6256 | 1 |
| 36 | 2.6286 | 11.1299 | 0.1856 | 0.3349 | 0.6632 | 1 |
| 37 | 2.7368 | 11.5680 | 0.2026 | 0.3643 | 0.6099 | 1 |
| 38 | 2.4562 | 10.7195 | 0.2105 | 0.3794 | 0.5750 | 1 |
| 39 | 2.8070 | 12.2715 | 0.1573 | 0.3149 | 0.5582 | 2 |
| 40 | 2.6786 | 11.1255 | 0.2086 | 0.3552 | 0.6204 | 1 |
| 41 | 2.1429 | 7.0011 | 0.1838 | 0.3941 | 0.6098 | 1 |
| 42 | 2.7667 | 12.4425 | 0.2098 | 0.3630 | 0.6089 | 1 |
| 43 | 2.3714 | 10.3138 | 0.1941 | 0.3498 | 0.6472 | 1 |
| 44 | 2.7586 | 12.5479 | 0.0773 | 0.3288 | 0.6122 | 1 |
| 45 | 2.7586 | 12.6629 | 0.0770 | 0.3273 | 0.6186 | 2 |
| 46 | 2.7586 | 12.6629 | 0.0770 | 0.3273 | 0.6186 | 2 |
| 47 | 2.7586 | 12.6629 | 0.0770 | 0.3273 | 0.6186 | 2 |
| 48 | 2.7586 | 12.5271 | 0.0774 | 0.3095 | 0.6181 | 2 |