

NOTAT

Projekt navn **Heimstaden – Mølleparkvej, Esbjerg**

Kunde **Raundahl & Moesby A/S**
 Notat nr. **1**
 Version **1**
 Til **Janus Westphal Hermansen**
 Fra **Thomas Bank Lauridsen**
 Kopi til

Udarbejdet af **Thomas Bank Lauridsen**
 Kontrolleret af **Jens Chr. Bennetsen**
 Godkendt af **Jens Chr. Bennetsen**

1. VINDVURDERING AF HEIMSTADEN

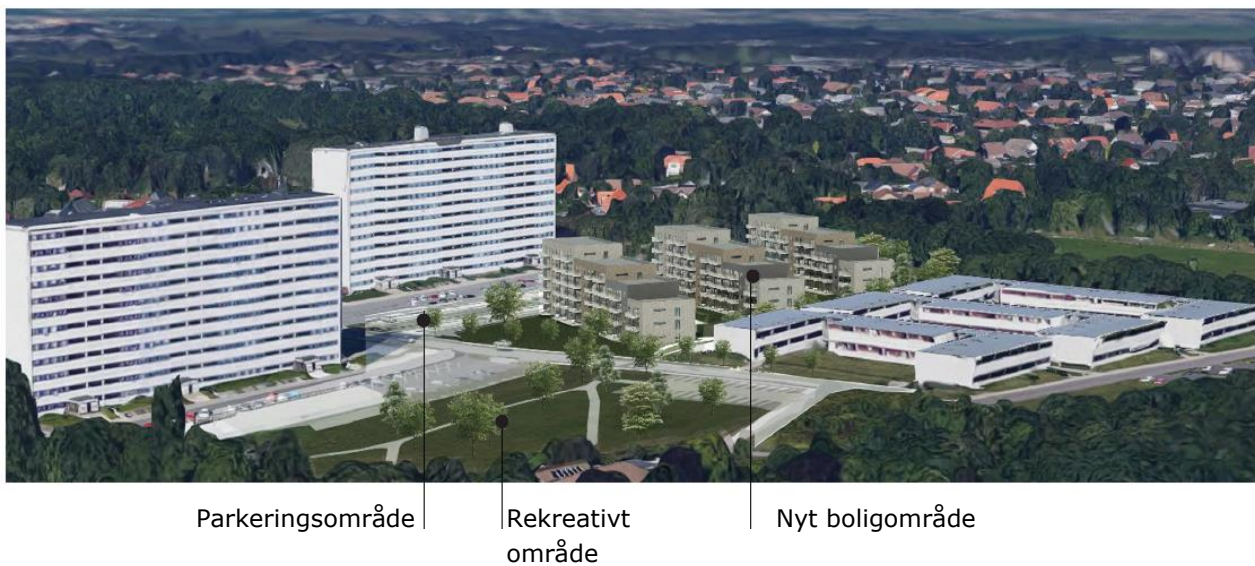
I forbindelse med opførelse af et nyt boligområde på Mølleparkvej i Esbjerg er der foretaget en vindvurdering med fokus på nærområdet omkring tre nye bygninger. Naboområder er også medtaget for at give et overblik over helheden.

På Figur 1 ses arkitektens rendering af byggeriet. Altanerne har placering mod sydvest og er beskyttet med en fast afskærmning på én side mod sydøst. På Figur 2 ses det nye byggeris placering i Esbjerg.

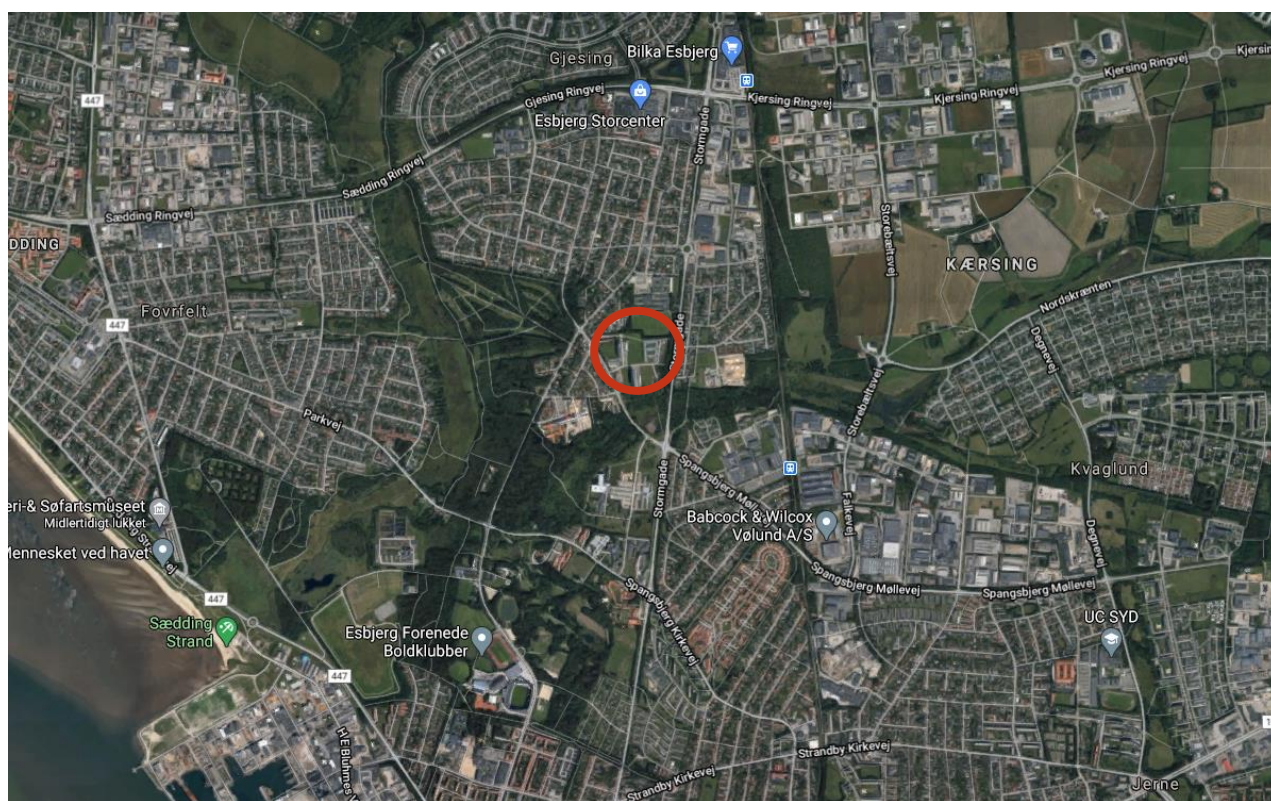
På Figur 3 ses modellen der er benyttet i vindvurderingen. Det nye byggeri er placeret i midten (rød), med de omkringlæggende bygninger (blå og lyseblå) og dele af den eksisterende og foreslåede vegetation (grøn).

Rambøll
 Hannemanns Allé 53
 DK-2300 København S

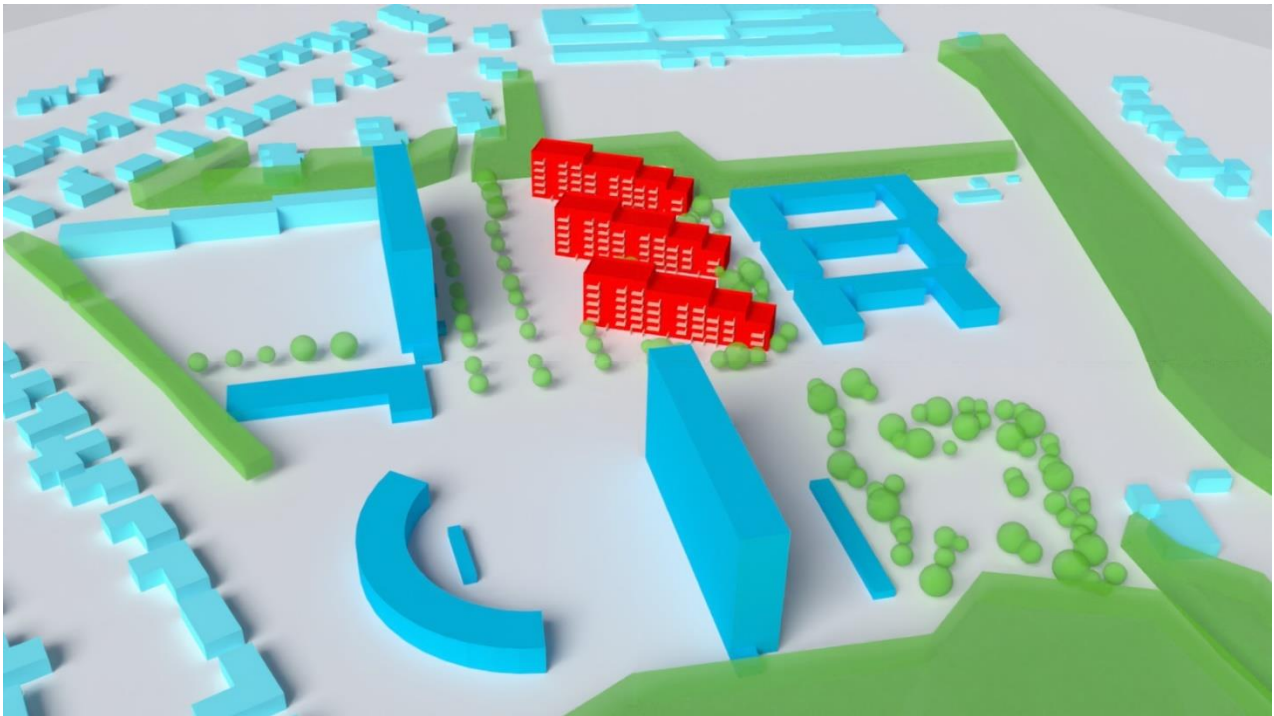
T +45 5161 1000
 F +45 5161 1001
<https://dk.ramboll.com>



Figur 1: Arkitektens rendering af byggeriet, set fra sydøst.



Figur 2: Placering af nyt byggeri i Esbjerg.



Figur 3: 3D model af byggeriet samt nærområdet med beplantning benyttet til vindanalysen.

2. SAMLET VURDERING OG OPSUMERING

Generelt er Esbjerg påvirket af den stærke vestenvind grundet byens placering og dette kommer allerede til udtryk flere steder i byen. For at imødekomme dette er vindkomforten og sikkerhedsforholdene ved det nye boligområde på Mølleparkvej blevet undersøgt og vurderet ved hjælp af CFD-simuleringer for at belyse forholdene ved etablering af et nyt byggeri.

Altanerne på det nye byggeri er medtaget i analysen for samtidig at kunne vurdere vindkomforten på disse.

Vurderingen af vindkomforten på fodgængerniveau viser et godt vindklima ved indgangspartier ved alle tre nye bygninger. Parkeringsområdet vest for byggeriet kan forekomme lettere vindblæst når vinden kommer fra syd på grund af kanaleffekter mellem det eksisterende og nye byggeri. Dette areal bruges dog ikke til ophold og vurderes derfor ikke som værende kritisk.

Dele af arealet mellem den nordligste og centrale bygning egner sig ikke til stillesiddende aktivitet hele året. Hele arealet mellem den centrale og sydlige bygning vil dog forekomme vindstille da dette område ligger i læ af det høje byggeri mod vest og den sydligste af de nye bygninger.

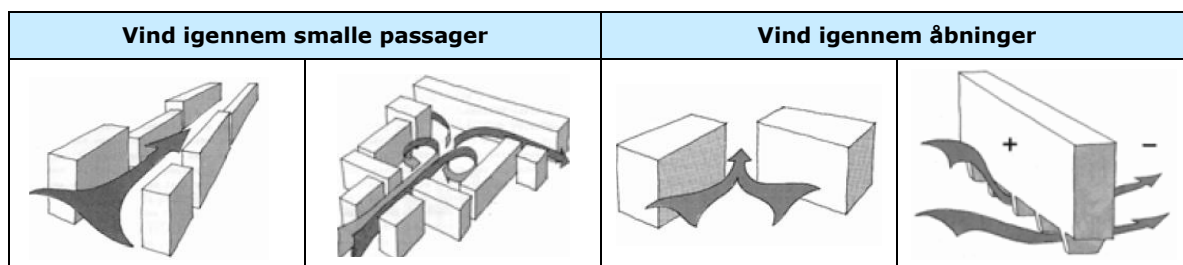
Vindkomforten på altanerne er generelt god. Dog kan den vestlige række altaner på den nordlige bygning samt den øverste række af altaner på den sydlige bygning opleve gener når vinden kommer fra vest.

Vindsikkerheden viser at alle områder karakteriseres som sikre med undtagelse af begrænsede områder omkring den høje bygning syd for det nye byggeri. Generelt vurderes det nye byggeri ikke at have nogen nævneværdig negativ indflydelse på de eksisterende vindforhold i området.

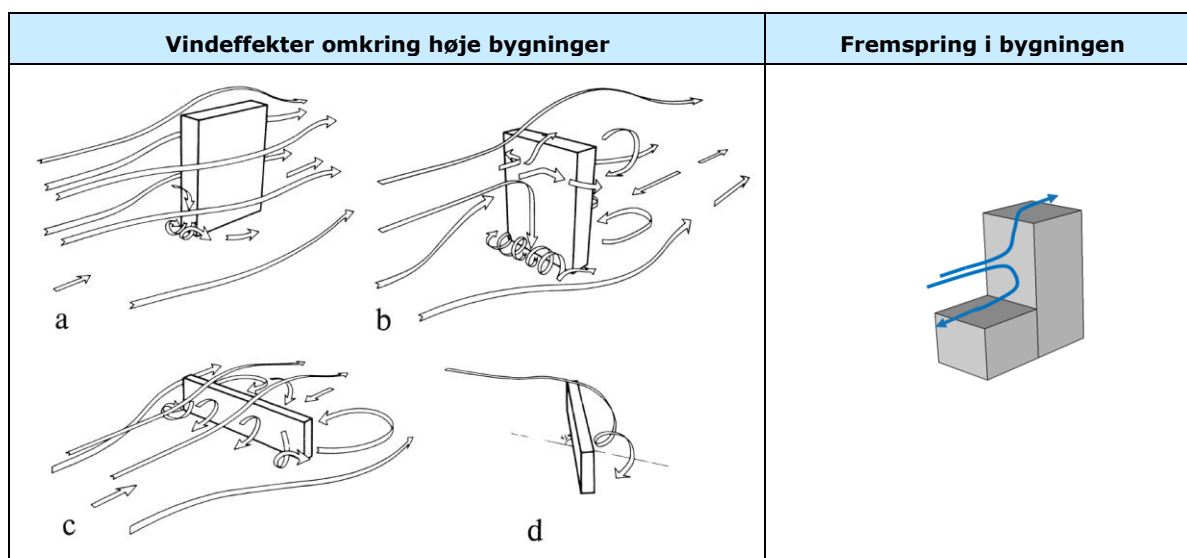
3. VINDMILJØ I BEBYGGEDE OMRÅDER

Når vind passerer hen over et tætbebygget bymiljø, vil der opstå storskala hvirvler (turbulens), der hvor vinden passerer hen over bygningstage, og der vil opstå kanalstrømninger, der hvor vinden fanges mellem bygningsfacader. Om dette har en positiv eller negativ effekt på det lokale vindmiljø, afhænger af situationen og orienteringen af bebyggelsen.

Generelt set vil vindforhold omkring bygninger være bestemt af gennemstrømningen af hele det omkringliggende område, fordi gennemstrømningen fører til komplekse samspil mellem vinden og bygningsstrukturene. Figur 4 viser eksempler på karakteristiske strømningssituationer for bebyggede områder. Her ses at ved smalle passager kan der forekomme kanal-effekt, som forøger vindhastigheden. Samtidig vil høje bygninger, der skyder betydeligt op over omkringliggende bebyggelse, fange vinden og føre den ned langs facaden mod jordniveau, som vist på principskitserne på Figur 5. Dette kan også medføre forstærket vindkraft nær hjørnerne af bygningen. Fremspring i bygningen kan ligeledes fange vinden og dirigere den nedad langs facaden.



Figur 4: Principskitser for luftstrømning omkring flere strukturer.



Figur 5: Principskitser for hvorledes høje bygninger fanger vinden. [1]

De eksisterende høje byggerier og nye bygningers individuelle placering altså altså komme til at have en stor effekt på vindgennemstrømningen af området og dermed have indflydelse på komforten. Effekten kan dog kun kvantificeres ud fra detaljerede strømningssanalyser i form af Computational Fluid Dynamics (CFD) af de specifikke lokale forhold. Metoden er nærmere beskrevet i appendiks A.

4. KOMFORT- OG SIKKERHEDSKRITERIER

For at kunne evaluere vindforholdene i et givet område opstilles overskridelseskriterier, der er et udtryk for hvor, hvornår og hvor ofte vindkomforten og sikkerheden kan opnås for at færdes i området og for forskellige aktiviteter. Disse kriterier anvendes på middelvindhastigheden og turbulensen i 1.5 meters højde, svarende til gennemsnitlig hovedhøjde for fodgængere.

Den hollandske norm NEN-8100 [2] beskriver følgende overskridelseskriterier af Gust Equivalent Mean (GEM) vindhastigheden for komfort og sikkerhed:

$$U_{GEM.komfort} = U + \sigma_U \geq 6 \text{ m/s} \quad (1)$$

$$U_{GEM.sikkerhed} = U + 3\sigma_U \geq 20 \text{ m/s} \quad (2)$$

Hvor U er middelhastigheden i m/s og σ_U er standardafvigelsen på hastigheden. Vindhastigheden for komfortkriteriet anvender et niveau på 6 m/s, svarende til anbefalinger efter Bottema [3].

Komfort og sikkerhedskriterierne bruges i kombination med en statistisk analyse ud fra de lokale vinddata og resultatet fra vindsimuleringerne for de enkelte retninger, til at give en sandsynlighedsfordeling af den årlige overskridelse af kriterierne i procent.

Overskridelsessandsynligheden af GEM komfort-vindhastigheden er klassificeret i fem komfortklasser i den hollandske norm [2] og kan ses i Tabel 4-1.

Som for komfortkriteriet bygger niveauinddelingen på, hvor tit sikkerhedskriteriet er overskredet. SBI-anvisningerne [4] anvender ikke et selvstændigt sikkerhedskriterium, men angiver at, hvis 5 m/s er overskredet mere end 53 % af tiden er det meget ubehageligt. Men den anvendte metode giver mulighed for et nærmere indblik i hvilken grad byrummet er vindpåvirkning ved stærk vind og hvem der kunne blive påvirket. Samt hvilken aktivitet det lokale område giver mulighed for.

Tabel 4-1: Komfortkriteriet fra den hollandske norm NEN-8100 [2].

Overskridelsessandsynlighed [%] for vindpåvirkning > 6 m/s	Komfort klasse	Hurtig gang	Spadsere	Siddende
< 2.5%	A	God	God	God
2.5 - 5%	B	God	God	Moderat
5 - 10%	C	God	Moderat	Dårlig
10 - 20%	D	Moderat	Dårlig	Dårlig
> 20%	E	Dårlig	Dårlig	Dårlig

Overskridelsessandsynligheden af GEM-vindhastigheden for sikkerhedskriteriet er blevet inddelt i tre klasser iht. den hollandske norm 8100 og ses i Tabel 4-2. Niveauinddelingerne giver mulighed for at kvantificere graden af påvirkningen og usikkerheden.

Tabel 4-2: Sikkerhedskriteriet fra den hollandske norm NEN-8100 [2].

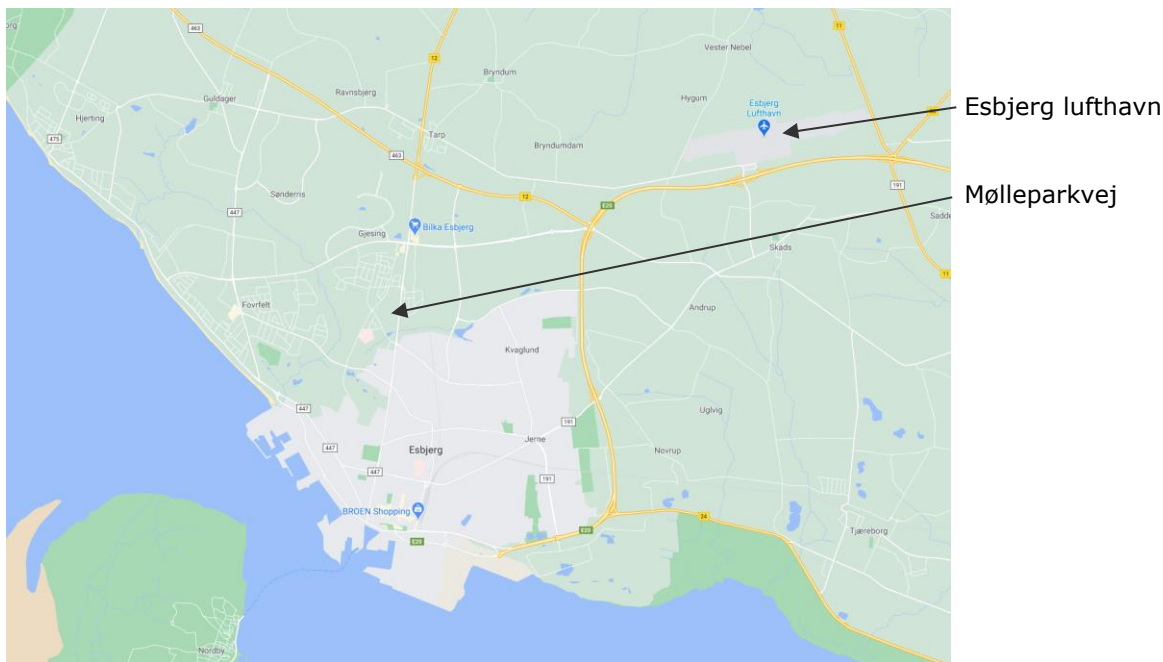
Overskridelsessandsynlighed [%] for vindpåvirkning > 20 m/s	Sikkerheds-klasse
< 0.05%	Sikkert
0.05-0.3%	Begrænset sikkert
> 0.3%	Usikkert

De tre sikkerhedsklasser defineres som følger:

- Områder, der ved stærk vind, **ikke betragtes som usikre** at færdes i og dermed er sikre for fodgængere og cyklister
- Områder med **begrænset sikkerhed** ved stærk vind som dermed er usikre for gangbesværede og ældre fodgængere og kan påvirke cyklister
- Områder hvor det er **usikkert** at færdes ved stærk vind for både fodgængere og cyklister

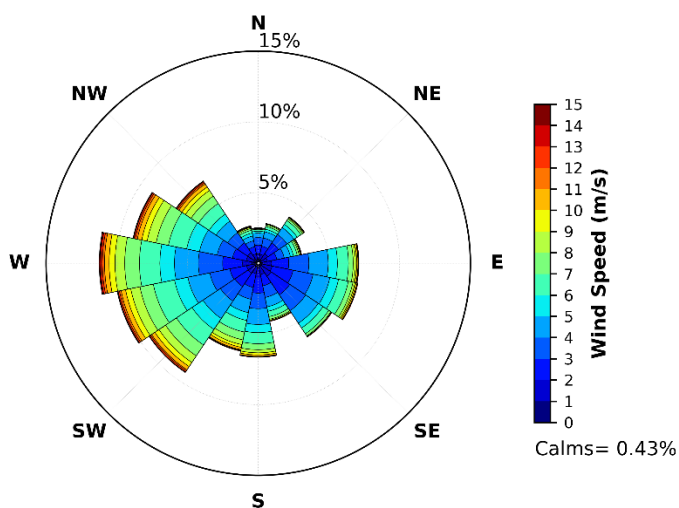
5. VINDDATA FOR OMRÅDET

Den nærmeste meteorologiske målestation med tilgængeligt data, befinder sig ved Esbjerg lufthavn. Disse vinddata er transformeret fra Esbjerg lufthavn til området ved Mølleparkvej, således dataene passer med de ændrede omgivelser og terræn.

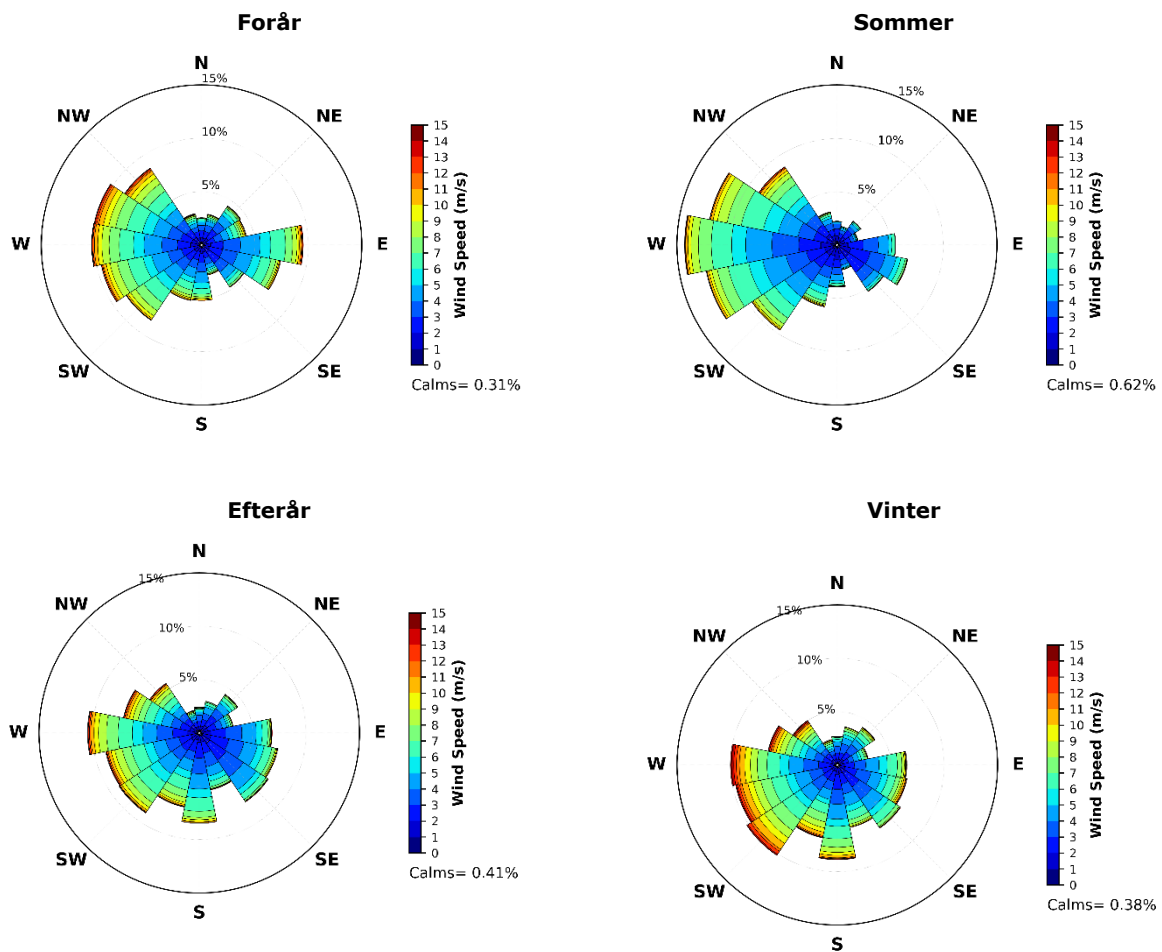


Figur 6: Placering af nybyggeri i forhold til Esbjerg lufthavns målestation.

Vindrosen for årsgennemsnittet fra Esbjerg lufthavn ses i Figur 7. De dominerende vindretninger er fra vest-nordvestlig til sydvestlige retninger. Middelvinden for alle vindretninger og 5.2 m/s på årsbasis målt i en højde på 10 meter over terræn. Vindroser for hver af de fire årstider separat ses i Figur 8.



Figur 7: Vindrose for årgennemsnittet fra Esbjerg med vindretning og hyppighed. Vindstatistikken er baseret på måledata fra Esbjerg lufthavn fra 2003 og til 2019 og er leveret fra NOAA NCDC climatic data service, DS3505.



Figur 8: Vindrose for hver af de fire årstider fra Esbjerg med vindretning og hyppighed. Vindstatistikken er baseret på måledata fra Esbjerg lufthavn fra 2003 og til 2019 og er leveret fra NOAA NCDC climatic data service, DS3505.

6. VINDVURDERING

Vindmiljøet omkring det nye byggeri på Mølleparkvej er blevet undersøgt ved hjælp af CFD-simuleringer og vindstatistik fra området er anvendt til at fastlægge vindkomforten og vindsikkerheden i området.

Undersøgelsen har fokus på området omkring byggeriet af de tre nye lejlighedsbygninger, som vil blive benyttet både til gennemgang mellem parkeringsplads og boliger samt som rekreativt område. Ligeledes er altanerne på de tre nye bygninger inkluderet, for at klarlægge komfortniveauet på disse.

Følgende appendikser er vedlagt:

Appendiks A: Beskriver metoden til beregning med CFD nærmere.

Appendiks B: Beskriver det anvendte statistiske data omkring fordelingen af vindhastigheder (Weibull fordelingen).

Appendiks C: Beskriver det beregningsnet, der er anvendt til undersøgelse af vindfordelingen.

Appendiks D: Beskriver vindprofilen, der anvendes som betingelser til simuleringerne.

Appendiks E: Beskriver overskridelsessandsynligheden af komfortkriteriet samt forstærkningsfaktoren i forhold til vindhastigheden i 10 meters højde 1.5 meter over terræn for hver af de undersøgte vindretninger.

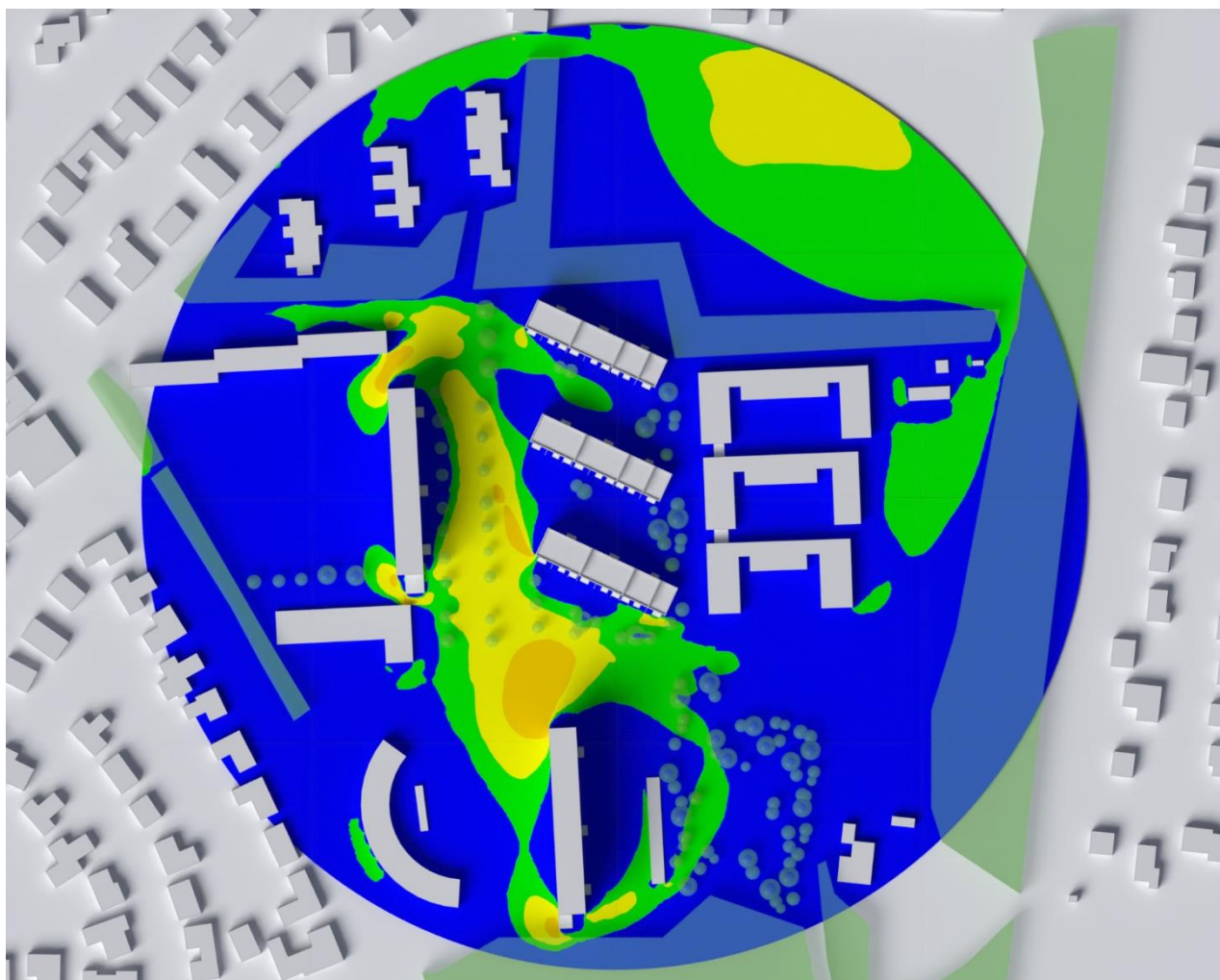
6.1 Vindkomfortvurdering

Nedenfor vises vindkomforten for årsgennemsnittet (Figur 9) og hver af de fire årstider (Figur 10) for området omkring Mølleparkvej. Omkring alle indgangspartier for bygningernes nordside ses der gode vindforhold. Dette er et resultat af at de dominerende vindretninger er fra syd til vest og indgangspartierne ligger derfor i læ. Imellem den nordligste og den midterste bygning findes en zone i kategori B som ikke egner sig til stillesiddende aktivitet. Det kan dog ses at samme område i sommermånederne ligger i kategori A. Hele området mellem den midterste og den sydlige bygning befinder sig i kategori A som egner sig godt til stillesiddende aktiviteter. Zonen opstår som resultat af lævirkningen fra det høje byggeri mod vest.

Parkeringsarealet vest for byggeriet befinder sig primært i kategori C med en lille del af zonen i kategori D. Dette ses dog ikke som værende et problem da området her primært vil blive brugt som transportstykke mellem parkeringspladser og lejligheder. Zonen opstår som følge af en kanal-effekt når vinden kommer fra syd og sydvest.

På det nordlige hjørne af den sydlige høje bygning opstår et større område i kategori D. Dette forsages af vindens forstærkning omkring den eksisterende bygning og er altså ikke et resultat af nybyggeriet.

Figur 11 og Figur 12 viser vindens forstærkningsfaktor og retning 1.5 meter over terræn for vinde fra sydvest og vest. For disse to retninger kan flere af de ovenstående effekter ses direkte for den aktuelle vindretning. Forstærkningsfaktor viser et forholdet mellem GEM vindhastigheden 1.5 m over terræn og den uforstyrrede reference vind i 10 meters højde målt ved lufthavnen.

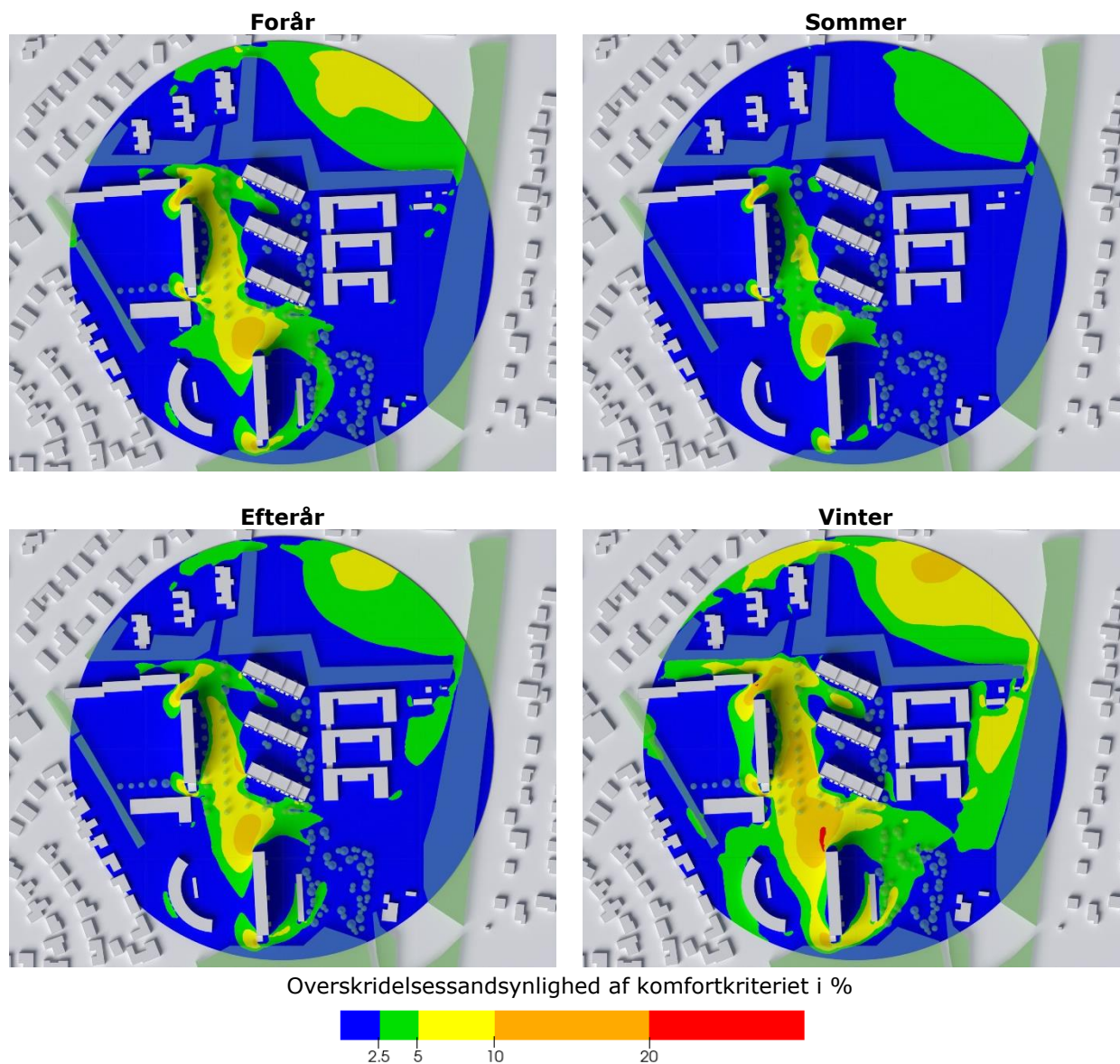


Overskridelsessandsynlighed af komfortkriteriet i %



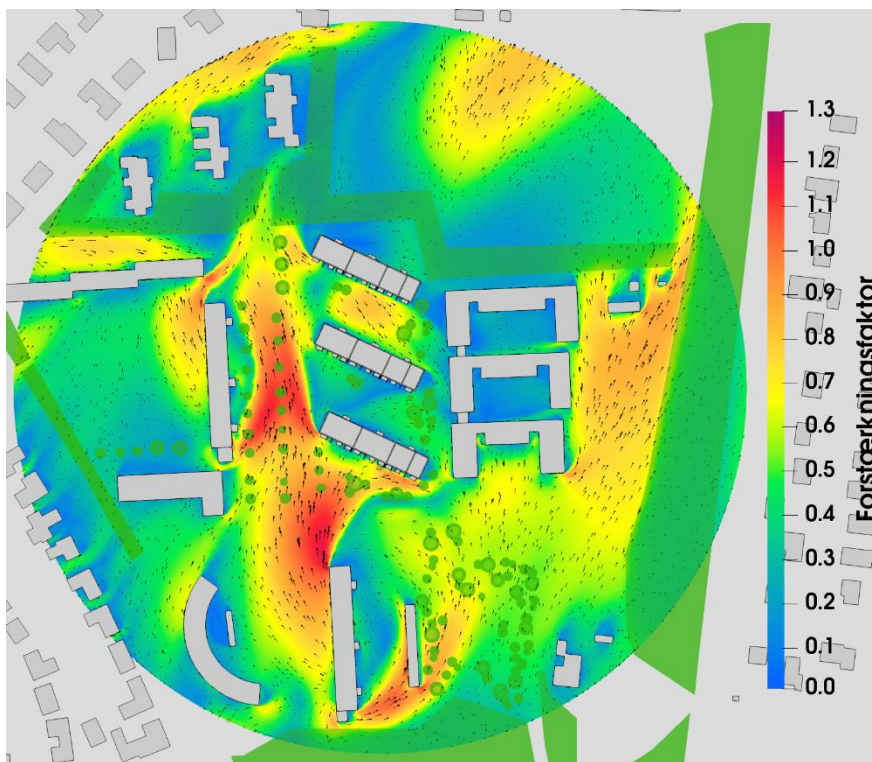
Komfortklasse	Anbefalet aktivitet
Kategori A	Siddende, anbefales til alle udendørs siddeområder, cafeområder, bænkeområder mv.
Kategori B	Spadserende og stående, anbefales til alle hovedindgange, drop-off områder, taxaholdepladser og busstoppesteder
Kategori C	Gående, anbefales til alle fortove, gågader og cykelstier
Kategori D	Moderat gående betingelser med potentielt blæsende eller ubehageligt vindmiljø. Anbefales centralt på gader med kørende fartøjer eller hvor fodgængeradgang kan begrænses
Kategori E	Blæsende eller ubehageligt vindmiljø

Figur 9: Vindkomfort for årligt gennemsnit målt 1.5 meter over terræn.

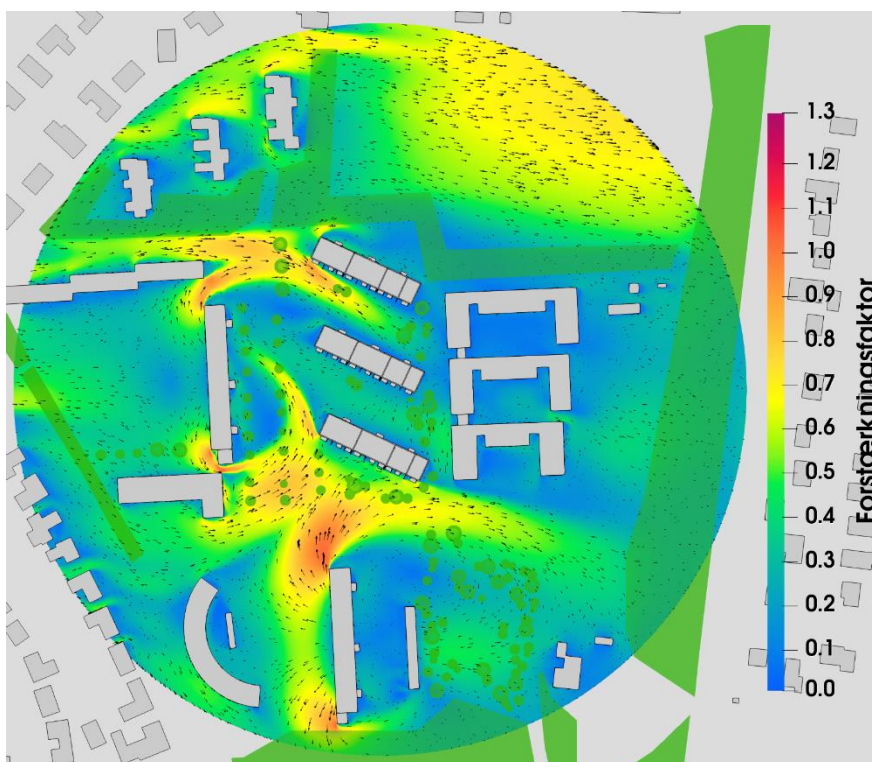


Komfortklasse	Anbefalet aktivitet
Kategori A	Siddende, anbefales til alle udendørs siddeområder, cafeområder, bænkeområder mv.
Kategori B	Spadserende og stående, anbefales til alle hovedindgange, drop-off områder, taxaholdepladser og busstoppesteder
Kategori C	Gående, anbefales til alle fortove, gågader og cykelstier
Kategori D	Moderat gående betingelser med potentielt blæsende eller ubehageligt vindmiljø. Anbefales centralt på gader med kørende fartøjer eller hvor fodgængeradgang kan begrænses
Kategori E	Blæsende eller ubehageligt vindmiljø

Figur 10: Vindkomfort for gennemsnittet af hver af de fire årstider målt 1.5 meter over terræn.

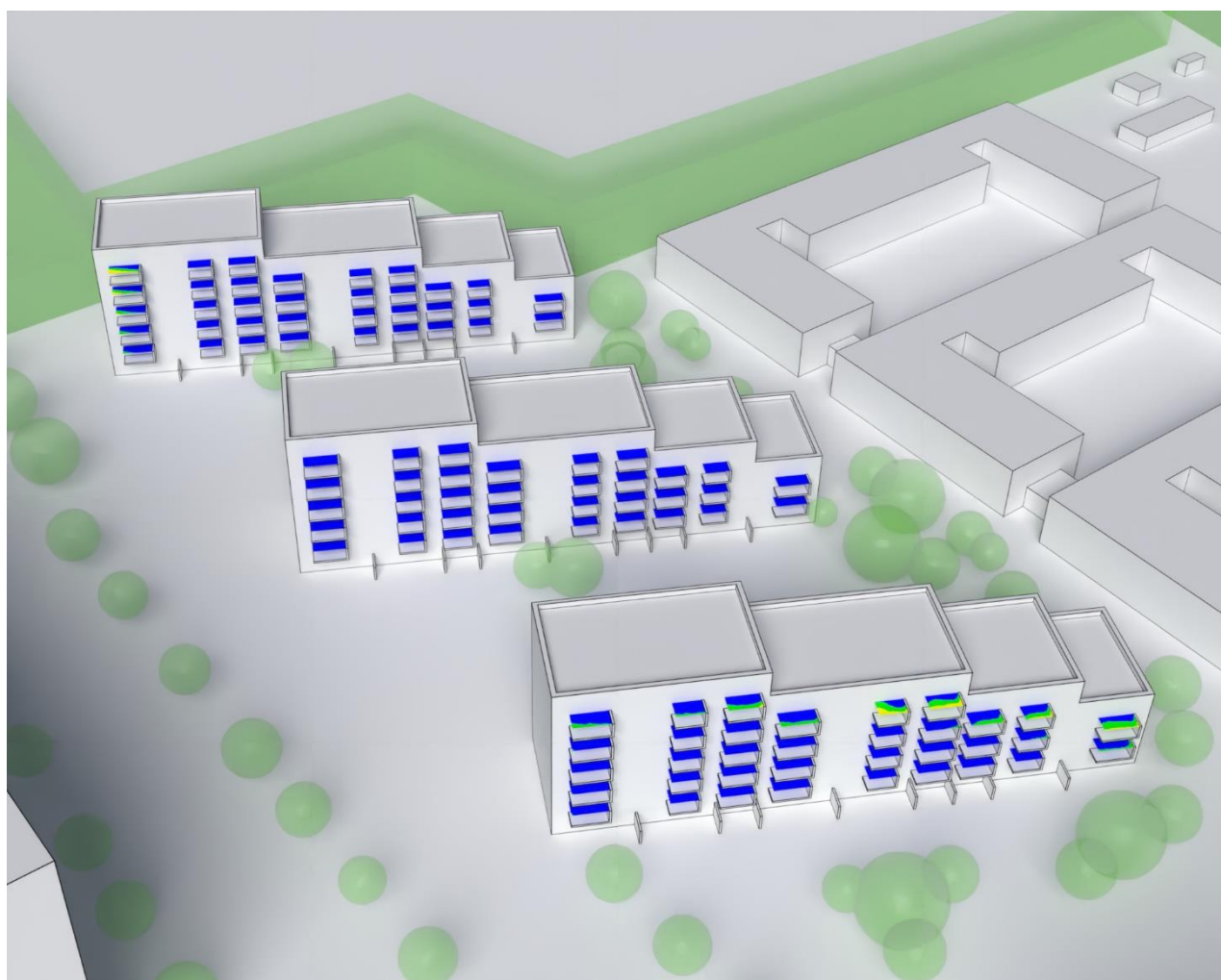


Figur 11: Vindens forstærkningsfaktor målt 1.5 meter over terræn for vind fra sydvest.



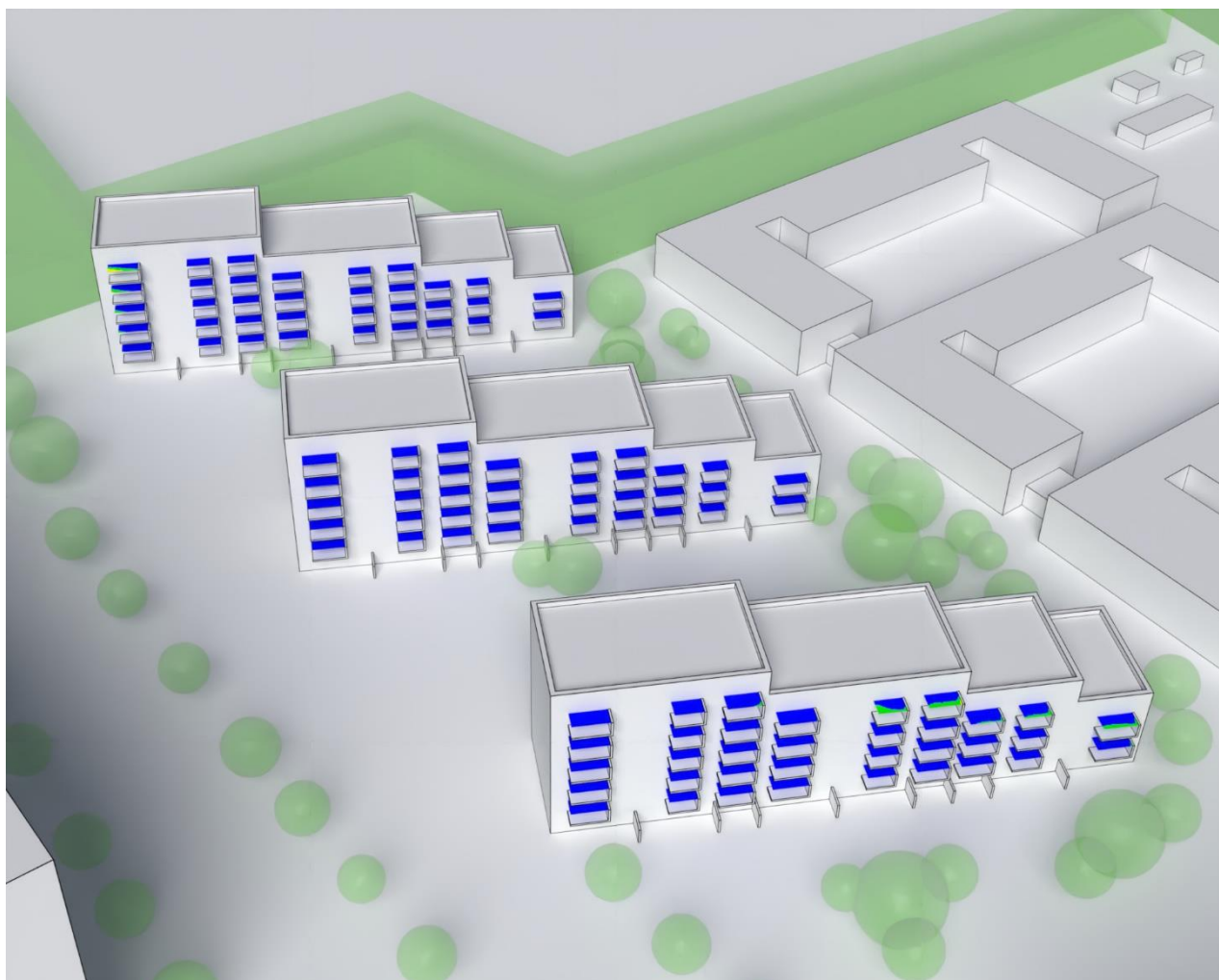
Figur 12: Vindens forstærkningsfaktor målt 1.5 meter over terræn for vind fra vest.

Komfortklassificeringen for altanerne på de tre nye bygninger kan ses på Figur 13 for årgennemsnittet og Figur 14 for sommermånederne. Hovedparten af altanerne befinder sig i kategori A som egner sig til stillesiddende aktivitet. En begrænset del af de vestlige altaner på den nordlige bygning samt de øverste altaner på den sydlige bygning befinder sig i kategori C. Da syd og vestlige vindretninger dominerer kan områderne i kategori C evt. forbedres ved at vende den faste afskærmning på altanerne mod vest. Det bemærkes dog at da komfortkriteriet er evalueret i 1.5 meters højde vil kategoriseringen ikke nødvendigvis ændre sig svarende til den faktiske effekt, der opleves af en afskærmning på en altan.



Komfortklasse	Anbefalet aktivitet
Kategori A	Siddende, anbefales til alle udendørs siddeområder, cafeområder, bænkeområder mv.
Kategori B	Spadserende og stående, anbefales til alle hovedindgange, drop-off områder, taxaholdepladser og busstoppesteder
Kategori C	Gående, anbefales til alle fortove, gågader og cykelstier
Kategori D	Moderat gående betingelser med potentielt blæsende eller ubehageligt vindmiljø. Anbefales centralt på gader med kørende fartøjer eller hvor fodgængeradgang kan begrænses
Kategori E	Blæsende eller ubehageligt vindmiljø

Figur 13: Vindkomfort for årligt gennemsnit målt 1.5 meter over meter over altanerne.



Komfortklasse	Anbefalet aktivitet
Kategori A	Siddende, anbefales til alle udendørs siddeområder, cafeområder, bænkeområder mv.
Kategori B	Spadserende og stående, anbefales til alle hovedindgange, drop-off områder, taxaholdepladser og busstoppesteder
Kategori C	Gående, anbefales til alle fortove, gågader og cykelstier
Kategori D	Moderat gående betingelser med potentielt blæsende eller ubehageligt vindmiljø. Anbefales centralt på gader med kørende fartøjer eller hvor fodgængeradgang kan begrænses
Kategori E	Blæsende eller ubehageligt vindmiljø

Figur 14: Vindkomfort for sommermånederne målt 1.5 meter over altanerne.

6.2 Vindsikkerhedsvurdering

Nedenfor vises vindsikkerheden (Figur 15) for området omkring Mølleparkvej. Generelt klassificeres området som sikkert. Kun omkring hjørnerne af de to høje bygninger findes afgrænsede områder med begrænset sikkerhed. Disse er ikke influeret af de nye bygninger, som dermed ikke har nogen negativ effekt for sikkerheden i området.



Overskridelsessandsynlighed af sikkerhedskriteriet i %

Begrænset Sikkert Usikkert	
0.05	0.3
Overskridelses- sandsynlighed [%] for vindpåvirkning > 20 m/s	Sikkerheds- klasse
< 0.05%	Sikkert
0.05-0.3%	Begrænset sikkert
> 0.3%	Usikkert

Figur 15: Vindsikkerhed for årligt gennemsnit målt 1.5 meter over terræn.

7. IDEER TIL VINDREDUCERENDE TILTAG

Der kan med fordel implementeres vindafskærmning i udsatte portåbninger, på tagterrasser, altaner og omkring udsatte bygningshjørner. Nogle eksempler på porøse afskærmninger er vist i Figur 16. Porøse afskærmninger med en åbningsgrad på 30-40% bryder vinden op og reducerede dens hastighed. Ved solide skærme bliver hele vinden dirigeret udenom og kan ikke strømme igennem. De skaber derfor ofte mere turbulens omkring dem og skarpere grænse mellem læ og vind områder.

Det er vigtigt at placere afskærmninger tæt på de områder, hvor man ønsker at skærme for vinden og opnå god komfort. En porøs skærm med åbningsgrad på ca. 40% (60% solid) giver læ ca. 5 x dens højde bagved skærmen og ca. 2 x dens højde foran. For tagområder bør de vindreducerende tiltage være mindst 1.3-1.5 meter i højde for at give tilstrækkelige læ bagved og primært placeret således at de kan afhjælpe de hyppigst vindretning som området er eksponeret for, dvs. vestlige til sydlige vinde.



Figur 16: Eksempler på beplantning og porøse læskærme som bryder strømmingen op og derved reducerer dens hastighed.

Ved anvendelse af lægivende beplantning er det væsentlig at de sikres at vinden ikke kan strømme under trækronen og derved stadig give gener. Et eksempel på beplantnings indflydelse på vinden ses på nedenstående figurer.



Figur 17: Betydning af bevoksningstæthed ved anvendelse af træer og busker.



Figur 18: Eksempler på forskellige bevoksningstæthed ved anvendelse af træer og busker.

8. REFERENCER

- [1] W. J. Beranek, »Wind Environment Around Single Buildings of Rectangular Shape,« *Heron*, årg. 29, nr. 1, pp. 3-31, 1984.
- [2] J. P. B. Blocken, »Pedestrian wind comfort around a large football stadium in an urban environment: CFD simulation, validation and application of the new Dutch wind nuisance standard,« *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, pp. 255-270, 2009.
- [3] A. Bottema, »Method for optimisation of wind discomfort criteria,« *Building and Environment*, årg. 35, 2000.
- [4] SBI-anvisning, 128, Vindmiljø omkring bygninger, 1. udgave, 1981.
- [5] P. J. Richards og R. P. Hoxey, »Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k- ϵ turbulence model,« *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, årg. 46, pp. 146-153, 1993.

APPENDIKS A: ANVENDT METODE FOR CFD

CFD

Computational Fluid Dynamics (CFD) er et kraftfuldt værktøj til analyse af fluidstrømninger. Som navnet indikerer, er det en computerbaseret metode, der bruges til løsning af de styrende ligninger for fluidbevægelser. Dette gøres i alle tre dimensioner.

Det første trin i CFD-modellering er at skabe en CAD-model af det komplette gennemstrømmede område, der ønskes simuleret. Derefter skabes et beregningsnet ved at inddеле området i meget mindre volumener, såkaldte kontrolvolumener. I teorien er der ingen begrænsning for størrelsen af CAD-modellen og detaljeringsgraden i beregningsnettet, men i praksis sætter computerkraften en grænse.

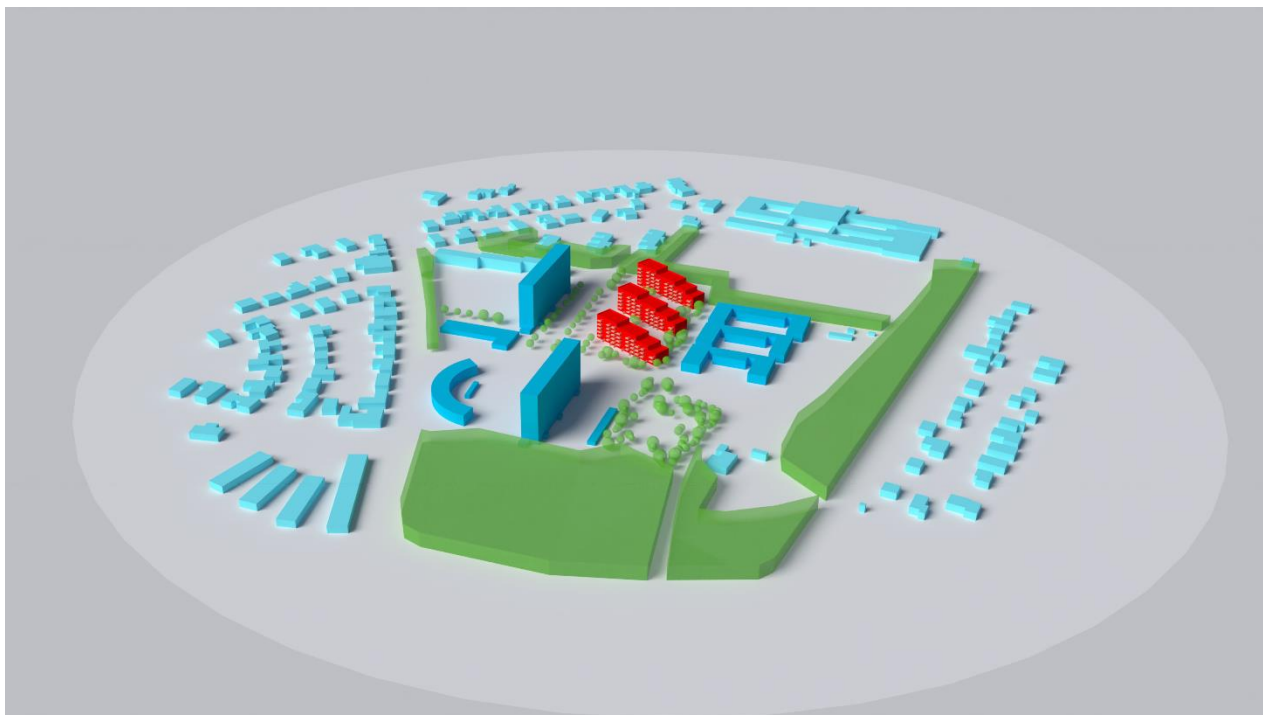
Det næste trin er at sætte den egentlige CFD-model op på det genererede net. CFD-softwaren som anvendes af Rambøll er Engys OpenFOAM 3.3 (www.engys.com). Dette er et generelt 3D CFD-program, som kan håndtere fluidstrømninger, turbulens og stråling. Kombinationen af modeller, som anvendes i en given model, vælges således, at alt betydningsfuld fysik inkluderes i det simulerede system.

CFD-modellen løses derefter på en iterativ måde. Resultatet fra simuleringerne er værdier for alle vigtige variable, såsom tryk, lufthastighed, temperatur og turbulens niveau i hver eneste kontrolvolumen. Disse værdier kan repræsenteres både kvalitativt i form af plots på planer eller overflader og kvantitativt i form af beregnede værdier, f.eks. middelhastigheden i udløbet til et beregningsdomæne eller kraften på en flade.

Geometri

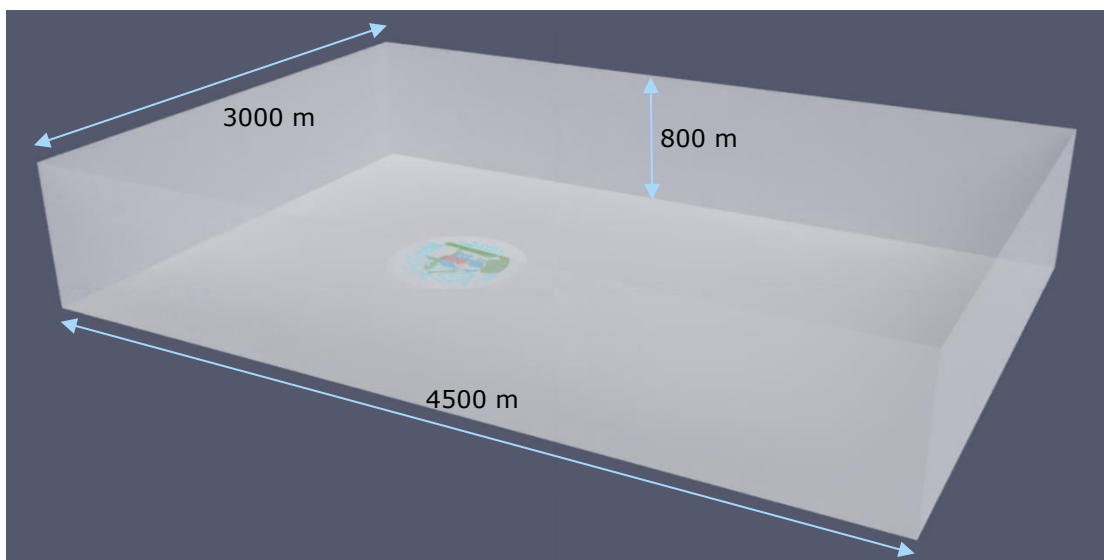
Vindmiljøet omkring de nye bygninger er i høj grad afhængig af udformningen af bygningerne samt deres indbyrdes placering og samspillet med den eksisterende bebyggelse.

På Figur A-1 ses 3D geometrien for området. De nye bygninger er farvet røde mens de eksisterende bygninger som størst indflydelse på vindforholdene er blå. De lyseblå bygninger er eksisterende byggeri i en radius af 300 m fra interesseområdet. Grønne kasser og kugler viser eksisterende og foreslået beplantning. Beplantningen modelleres som porøse elementer og vil således kun bremse vinden og ikke stoppe den.



Figur A-1: Den undersøgte geometri set fra sydøst. De nye bygninger er røde, bygninger med stor indflydelse på de lokale forhold er blå mens resterende bygninger er lyseblå. Grønne områder er modelleret beplantning.

Domænet er afgrænset i en kasse med 3000 m x 4500 m og det er 800 m højt. I midten er nybyggeriet placeret, se Figur A-2.



Figur A-2: Beregningsdomæne med model af nyt og omkringliggende byggeri.

Anvendte modeller

Ud over geometrien/beregningsnettet og valget af randbetingelser har valget af beregningsmodeller stor betydning for CFD-resultaterne.

Tidslighed

Som størstedelen af alle virkelige systemer, er strømmingen af vind et tidsafhængigt system. På trods af dette er alle de udførte CFD-beregninger "steady state" eller konstante i tiden. Det vil sige, at resultaterne er øjebliksbilleder af ligevægten i systemet for en given situation (vindhastighed, vindretning osv.) Sådanne resultater viser naturligvis en mindre kompleks dynamik i systemet.

Turbulens

For at få turbulenseffekten med i simuleringerne er det nødvendigt at anvende en såkaldt turbulensmodel. Dette skyldes for det første, at det ikke er praktisk muligt at anvende et beregningsnet på denne størrelse model, som er tilstrækkeligt fint til at opløse samtlige turbulente hvirvler. For det andet er turbulens kaotiske transiente fluktuationer, og eftersom simuleringerne er øjebliksbilleder, bliver disse fluktuationer ikke opfanget.

Til beregning af turbulensen er en realizable $k-\epsilon$ turbulence model blevet anvendt.

APPENDIKS B: METEOROLOGISK DATA STATISTIK

De vinddata, der er registreret på den meteorologiske referencestation, er blevet kontrolleret, rensat for mistænkelige hændelser og gendanset for at skabe et ensartet datasæt, der skal anvendes til den statistiske analyse af vindmiljøet. Der er anvendt en retningsbestemt gruppering (16 intervaller) til at tildele de meteorologiske data til den tilsvarende vindsektor. En Weibull-fordeling er derefter benyttet på den retningsbestemte vinddata:

$$\text{Probability Distribution Function:} \quad (U, \theta) = P(\theta) \frac{b}{a} \left(\frac{U}{a} \right)^{b-1} e^{-(U/a)^b} \quad (3)$$

$$\text{Cumulative Distribution Function:} \quad (U, \theta) = P(\theta) (1 - e^{-(U/a)^b}) \quad (4)$$

Hvor U er vindhastigheden, θ er den vurderede vindsektor, $P(\theta)$ er den samlede sandsynlighed for forekomst for vindsektoren, og a og b er Weibull-distributionsparametrene.

Retningssandsynlighedsværdierne samt Weibull-parametrene er opsummeret i Tabel B-1:

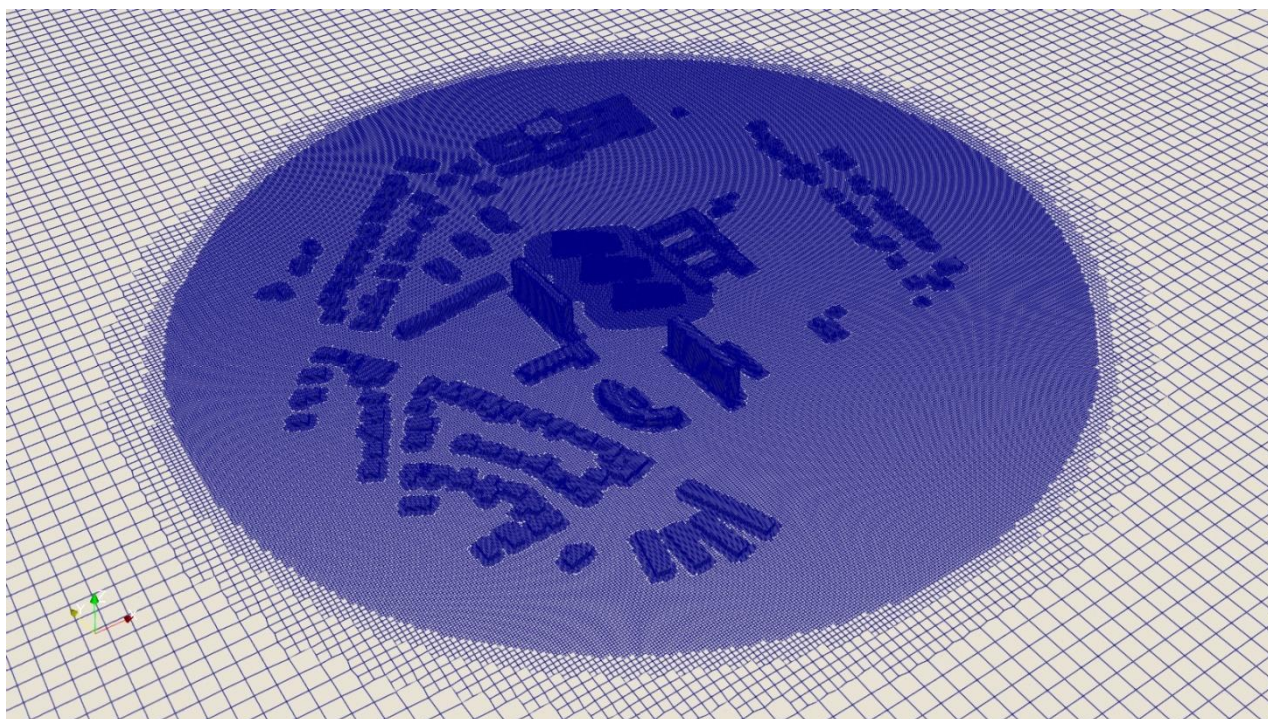
Tabel B-1: Vindsektorsandsynlighed og Weibull parametre

Vindretning (°)	Sandsynlighed (%)	a	b
0.0	2.5	3.50	1.80
22.5	2.9	3.97	1.81
45.0	3.9	4.05	1.79
67.5	3.1	4.20	1.71
90.0	7.1	4.69	2.09
112.5	7.2	4.48	2.01
135.0	6.3	3.92	2.14
157.5	4.2	4.22	1.92
180.0	6.6	4.90	1.88
202.5	6.3	5.52	1.90
225.0	9.3	5.94	2.06
247.5	10.2	6.02	2.07
270.0	11.2	5.89	1.92
292.5	9.0	6.21	2.03
315.0	7.0	5.97	1.81
337.5	2.7	4.22	1.51

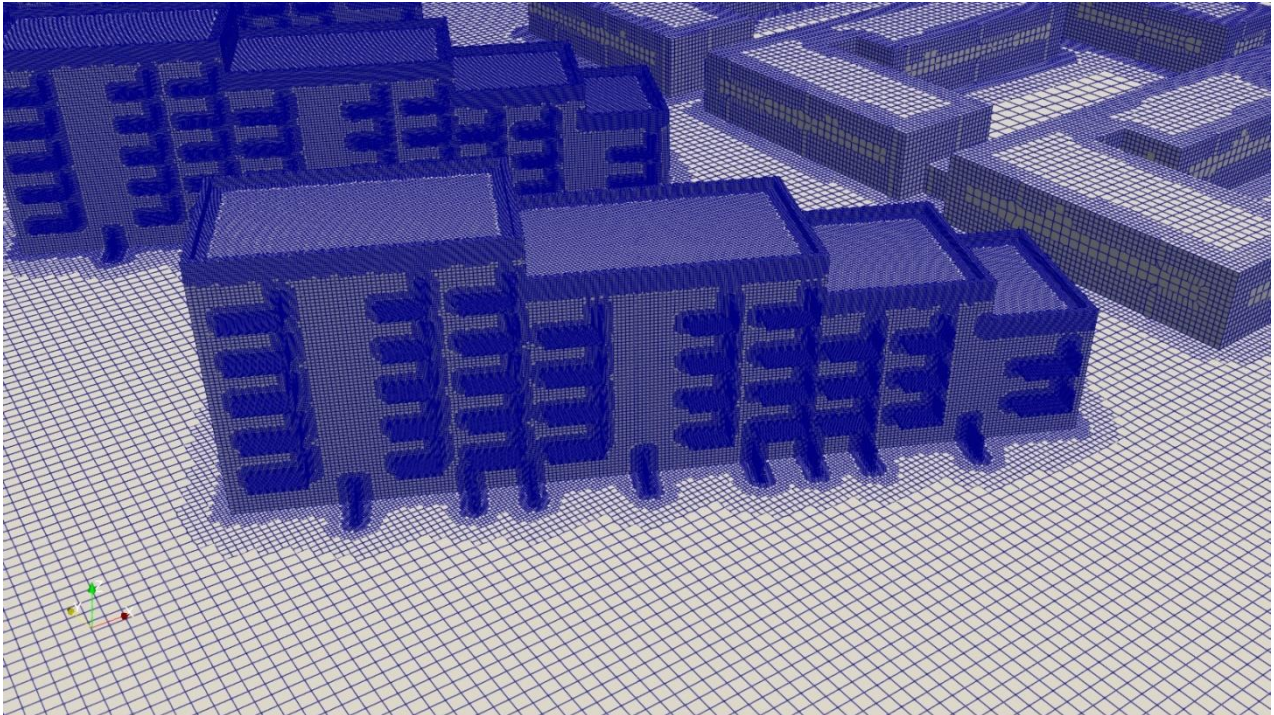
APPENDIKS C: BEREGNINGSNET/MESH AF SIMULERINGEN

Det rumlige diskretiserings/beregningsnet (mesh) er udarbejdet til at sikre simuleringernes nøjagtighed og samtidig optimere turn-around-tiden. Der er anvendt volume- og afstands-forfining for at reducere celledimensionerne i de områder, der er interessante. Dvs. den maksimale celledimension i nærheden af målbygningerne er 50 centimeter i fuld skala. Denne dimension er reduceret ned til 6.25 centimeter i de områder, hvor høje hastigheds gradienter og turbulensintensitet-niveauer forventes at forekomme. Ydermere er der benyttet mere end 10 celler over smalle passager, for at sikre disse fænomener bliver fanget. Tre prismelag er blevet brugt til hver vægflade i simuleringen for bedre at fange nær-væg effekter.

Det endelige mesh til simuleringen er vist i Figur C-1 og Figur C-2. Beregningsnettet består af omkring 13 millioner celler.



Figur C-1: Mesh af ny bygning og omkringliggende bygninger.



Figur C-2: Mesh, nærbillede fra sydvest.

APPENDIKS D: INDLØBSRANDBETINGELSER

Et neutralt logaritmisk vindhastighedsprofil er benyttet som indløbs randbetingelser. Den atmosfæriske grænselagsprofil beskrevet af Richards og Hoxey [5] og er blevet brugt som indløbsrandbetingelser for vindhastighedsprofilen $U(z)$ og turbulensparametrene, k og ε :

$$U(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$$

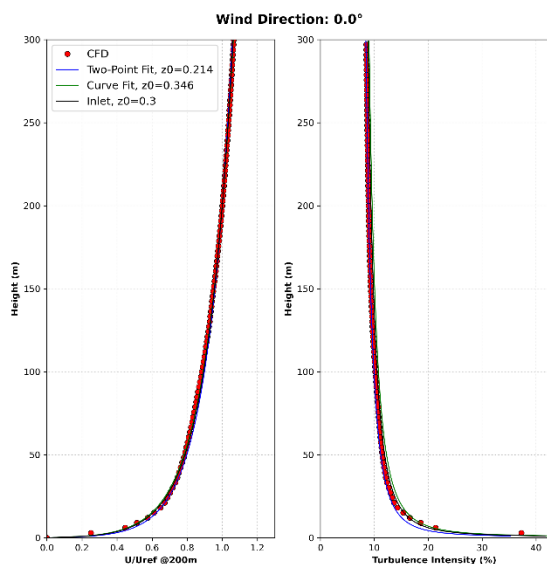
$$k = \frac{u^{*2}}{\sqrt{C_\mu}}$$

$$\varepsilon(z) = \frac{u^{*3}}{\kappa z}$$

hvor U er vindhastigheden, k er den turbulente kinetiske energi, ε er turbulens spredning sats, u^* er friktionshastigheden, κ er Von Karman konstant, z_0 er den aerodynamiske ruhedslængde og z er den lodrette koordinat over jordoverfladen.

Den aerodynamisk ruhedslængde er nøje valgt til at repræsentere omgivelserne på stedet for hver vindretning. Flere terrænkategorier er inkluderet for præcist at gengive opbygningen af vindprofilen. Beregningsnettet og vægfunktioner på det yderst omkringliggende jord og havet er specificeret for at bevare det ønskede hastigheds- og turbulensprofil op til det område af CFD-domænet, hvor bygningerne er modelleret. Derudover er ændringer i terrænhøjde også inkluderet i analysen.

Figur D-1 viser en sammenligning mellem målprofiler og de værdier, der er opnået i CFD-simuleringen for både vindhastigheden og turbulensintensiteten. Profilmrådet er målt ca. 500 meter opstrøms fra den første omkringliggende bygning, der ligger længst opstrøms. Simuleringen er i stand til at gengive og vedligeholde de ønskede lodrette profiler.



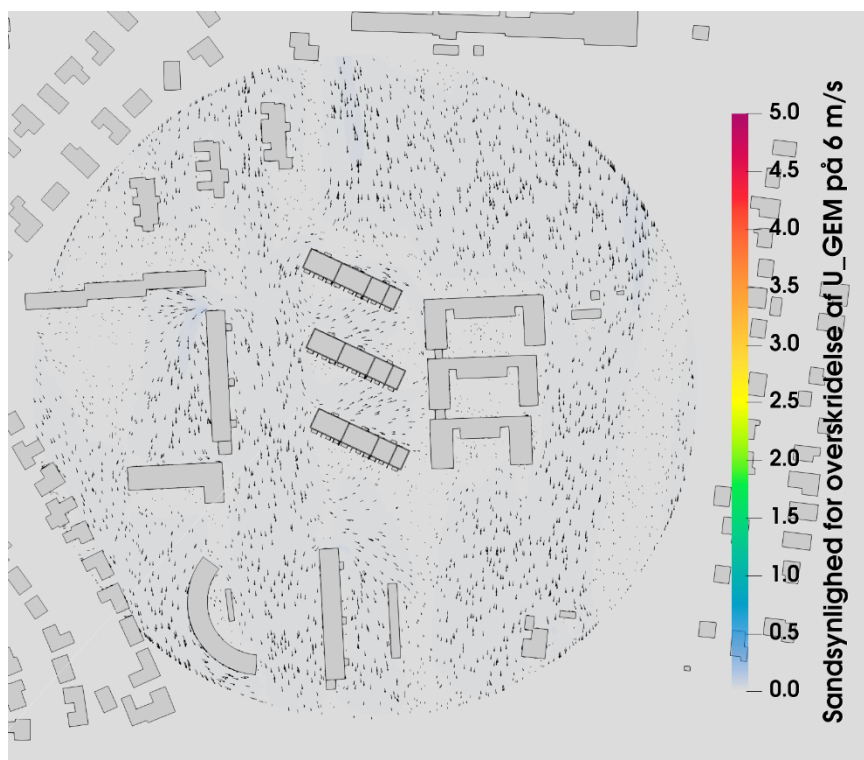
Figur D-1: Indløbsbetingelser og vindprofilen ca. 800 m opstrøms af det nye byggeri.

APPENDIKS E: RETNINGSBESTEMT SANSYNLIGHED FOR OVERSKRIDELSE AF KOMFORT KRITERIET

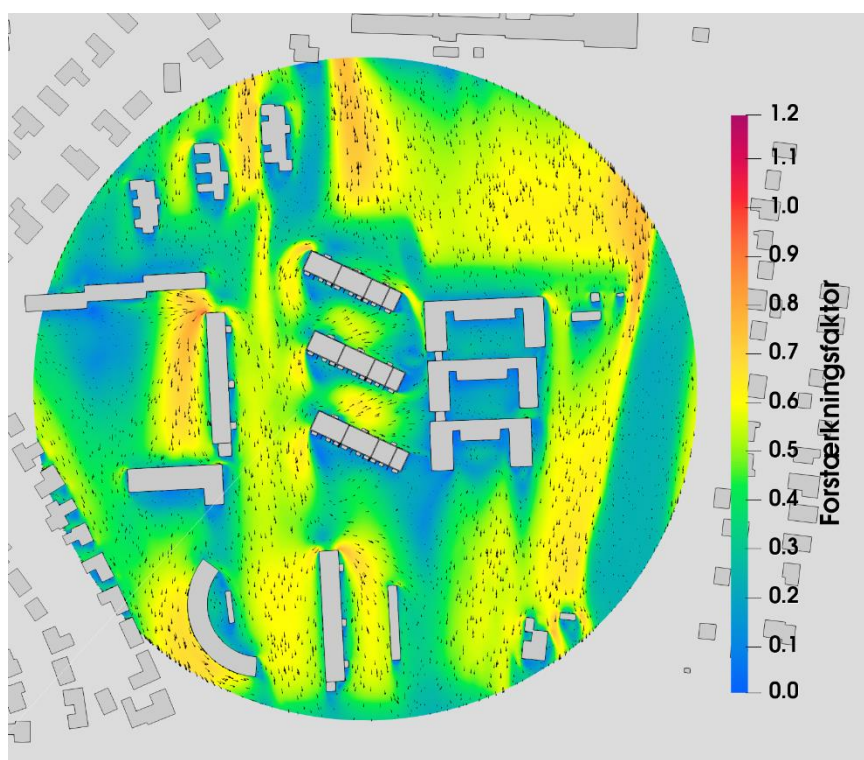
På de følgende sider findes den retningsbestemte sandsynlighed for overskridelse af GEM for komfortkriteriet på 6 m/s i ligning (1) vist 1.5 m over terræn. Sandsynligheden for overskridelse af komfortkriteriet er en kombination af de statiske vinddata fremvist i vindrosen i Figur 7 og de lokale vindforhold fundet ved CFD-analysen. Det betyder at selvom der for en vindretning findes en høj forstærkningsfaktor bidrager denne ikke nødvendigvis til en høj overskridelsessandsynlighed. Hver vindretning kombineres med den statiske analyse beskrevet i Appendiks B for at opnå komfort og sikkerhedsanalyserne for alle vindretninger i Figur 9 og Figur 15.

Under hver figur med overskridelsessandsynligheden vises den GEM vindhastigheden som en forstærkningsfaktor målt i forhold til vindhastigheden ved Esbjerg lufthavn. Ved en forstærkningsfaktor på 1.2 forstås at hvis vindhastigheden i 10 meters højde ved lufthavnen er 5 m/s, så vil den lokale hastighed i modellen være $1.2 \times 5 \text{ m/s} = 6 \text{ m/s}$.

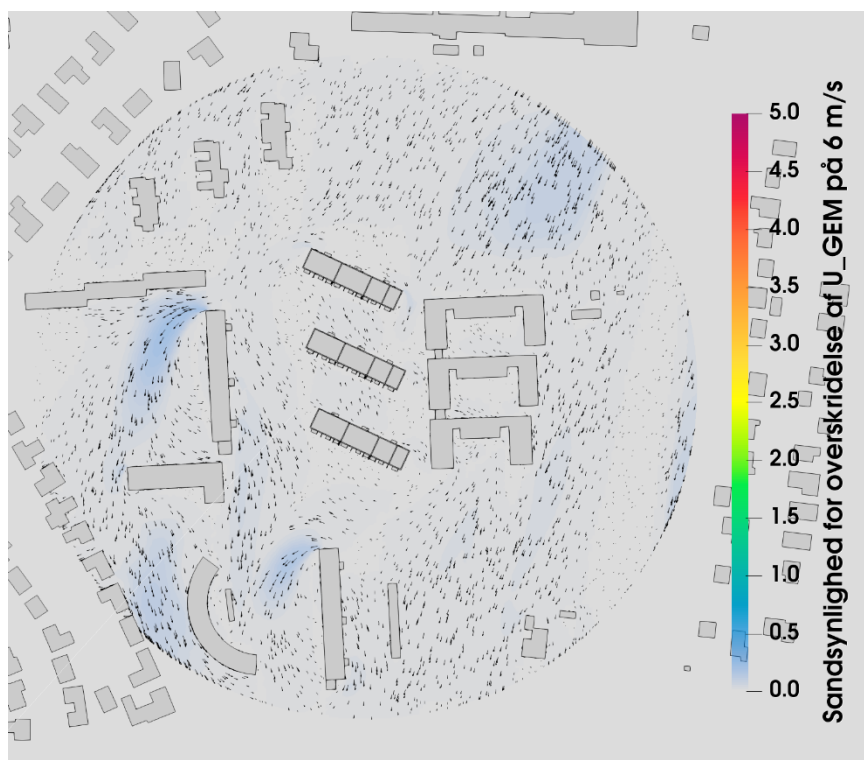
Af figurerne ses det at det primært er de sydlige og vestlige vindretninger der bidrager til overskridelsessandsynligheden på komfortkriteriet.



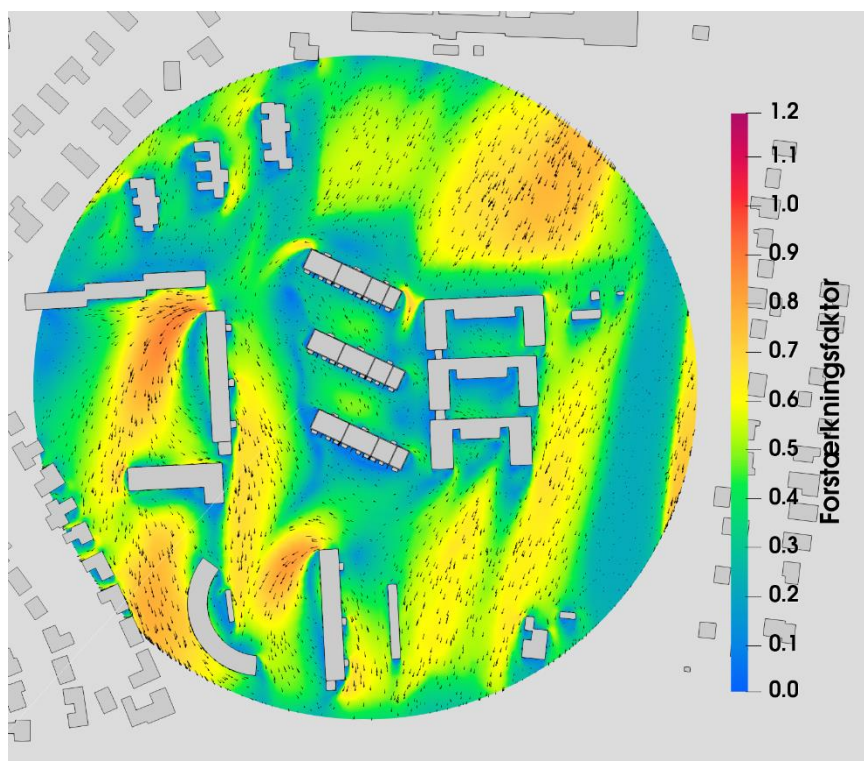
Figur E-1: Retningsbestemt sandsynlighed for overskridelse af komfortkriteriet på 6 m/s, nord.



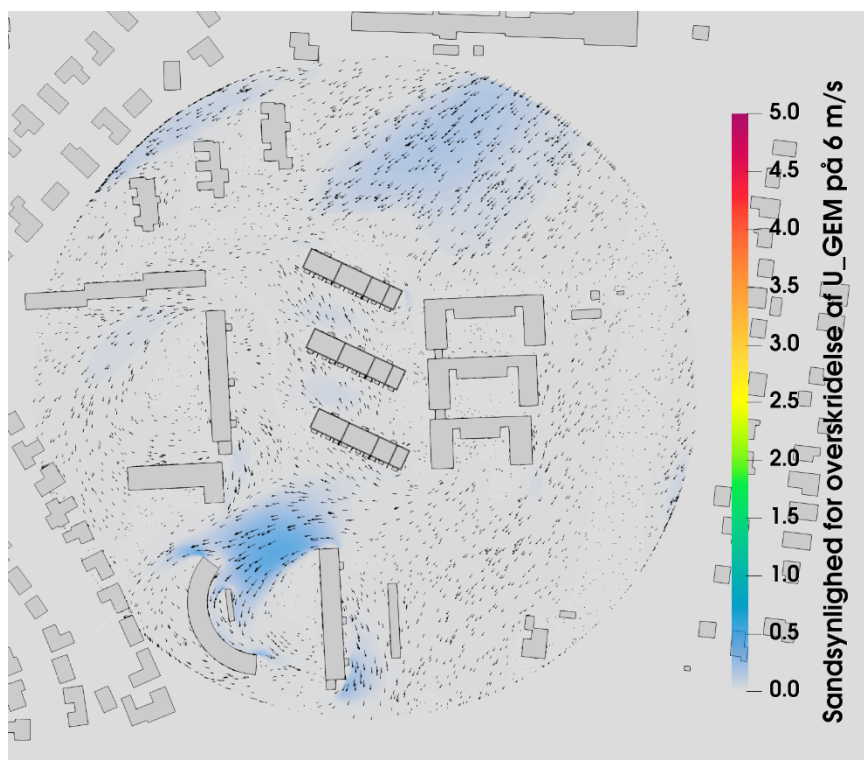
Figur E-2: Forstærkningsfaktor for vind fra nord.



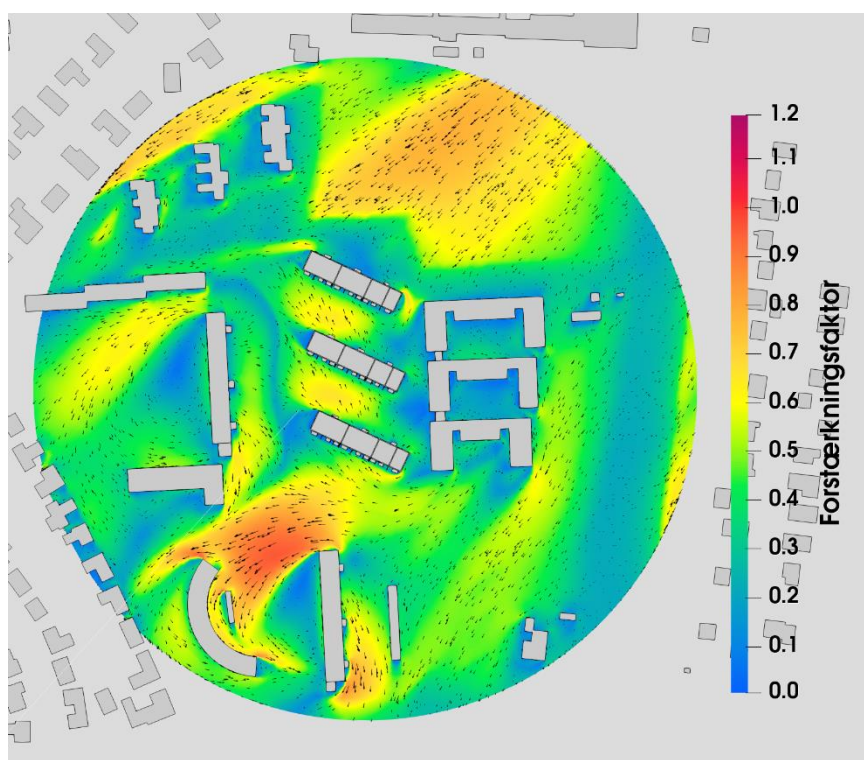
Figur E-3: Retningsbestemt sandsynlighed for overskridelse af komfortkriteriet på 6 m/s, nord-nordøst.



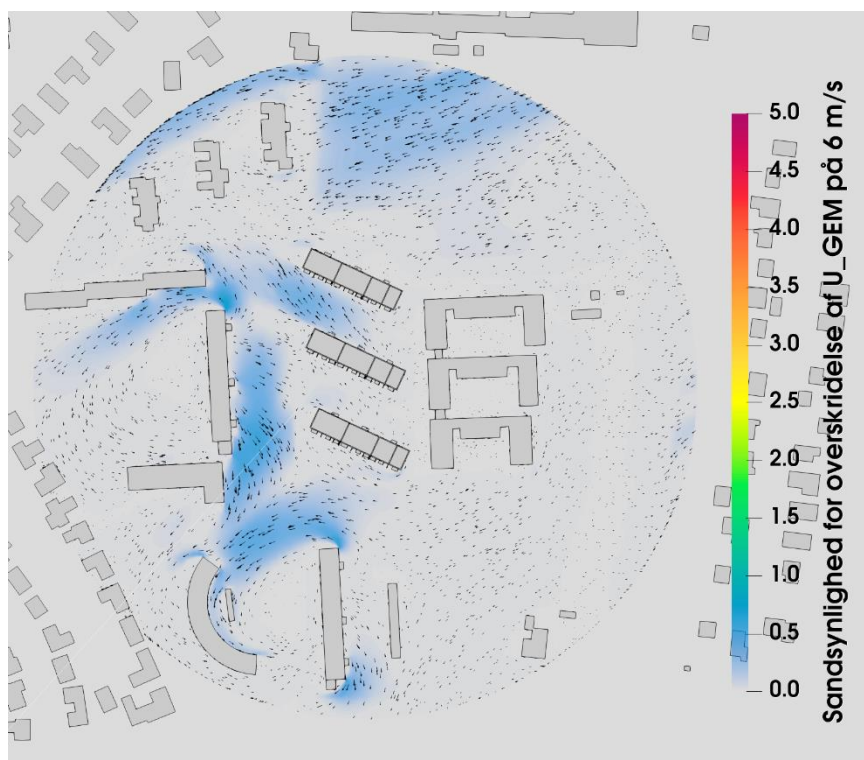
Figur E-4: Forstærkningsfaktor for vind fra nord-nordøst.



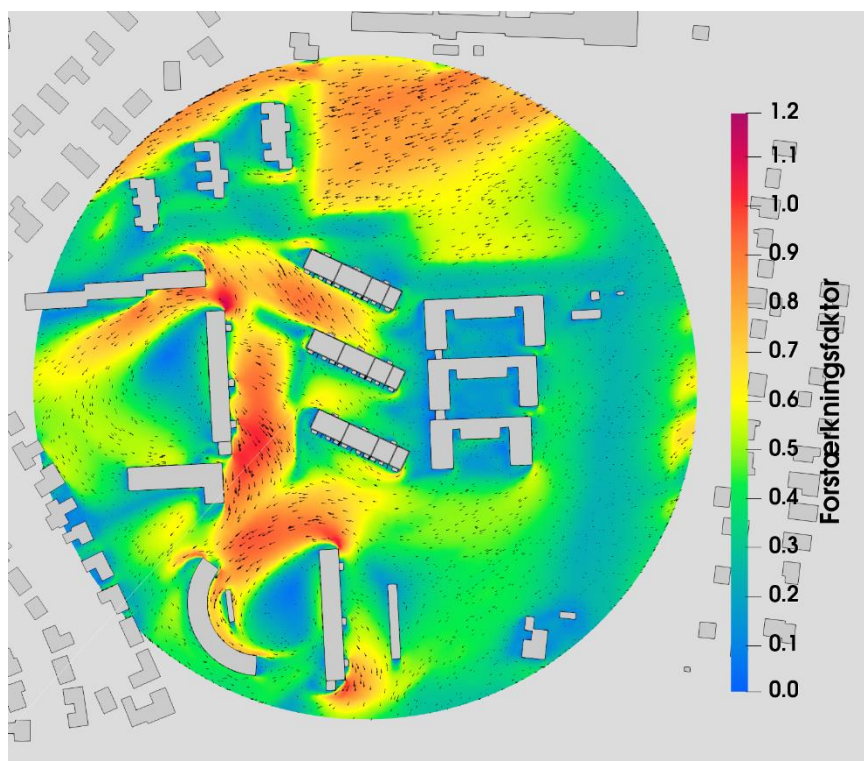
Figur E-5: Retningsbestemt sandsynlighed for overskridelse af komfortkriteriet på 6 m/s, nordøst.



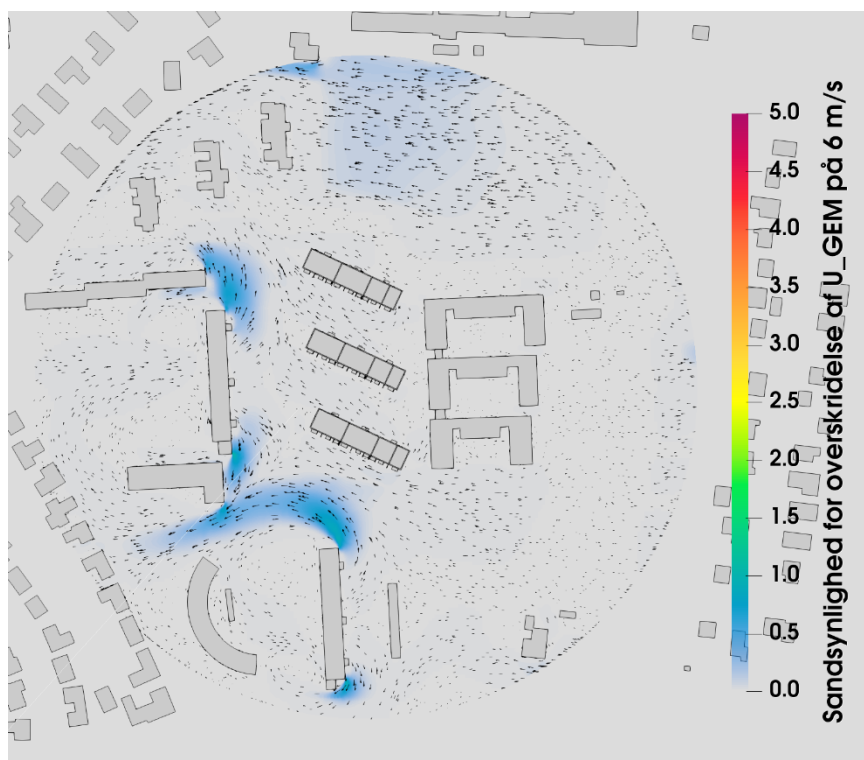
Figur E-6: Forstærkningsfaktor for vind fra nordøst.



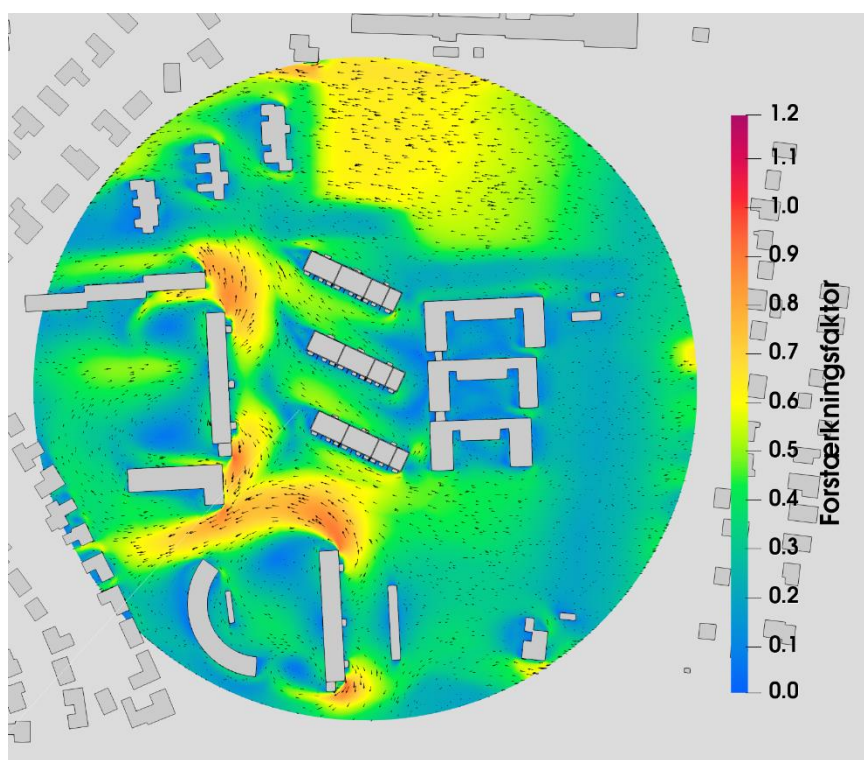
Figur E-7: Retningsbestemt sandsynlighed for overskridelse af komfortkriteriet på 6 m/s, øst-nordøst.



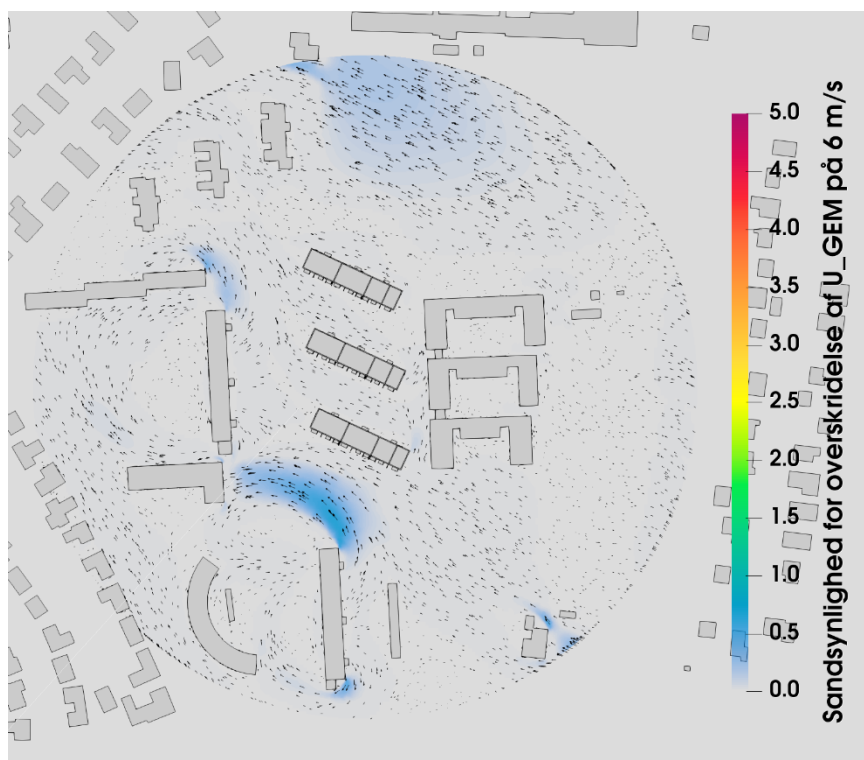
Figur E-8: Forstærkningsfaktor for vind fra øst-nordøst.



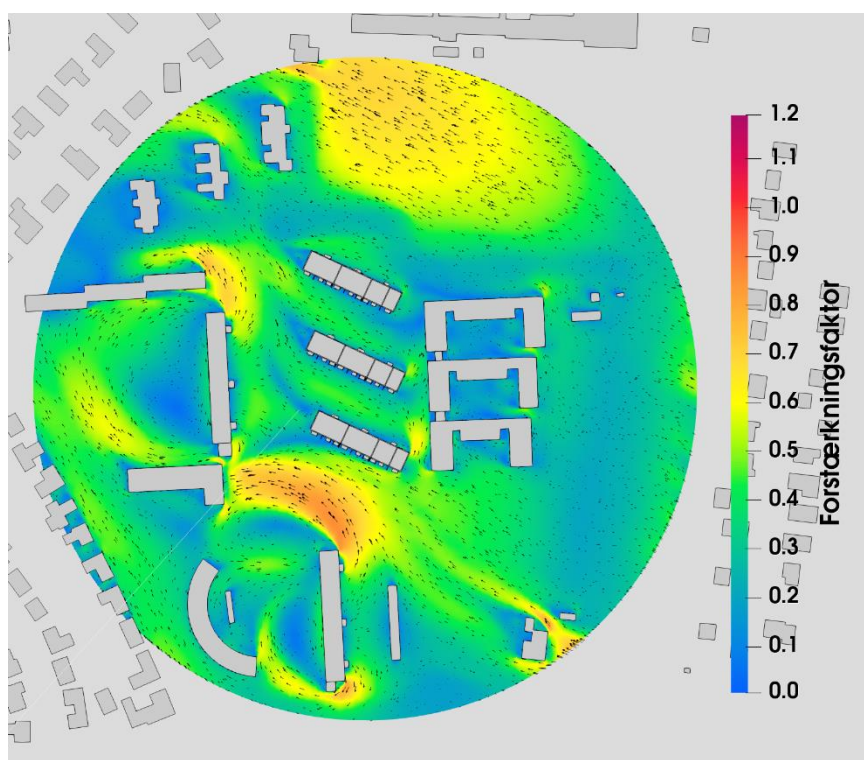
Figur E-9: Retningsbestemt sandsynlighed for overskridelse af komfortkriteriet på 6 m/s, øst.



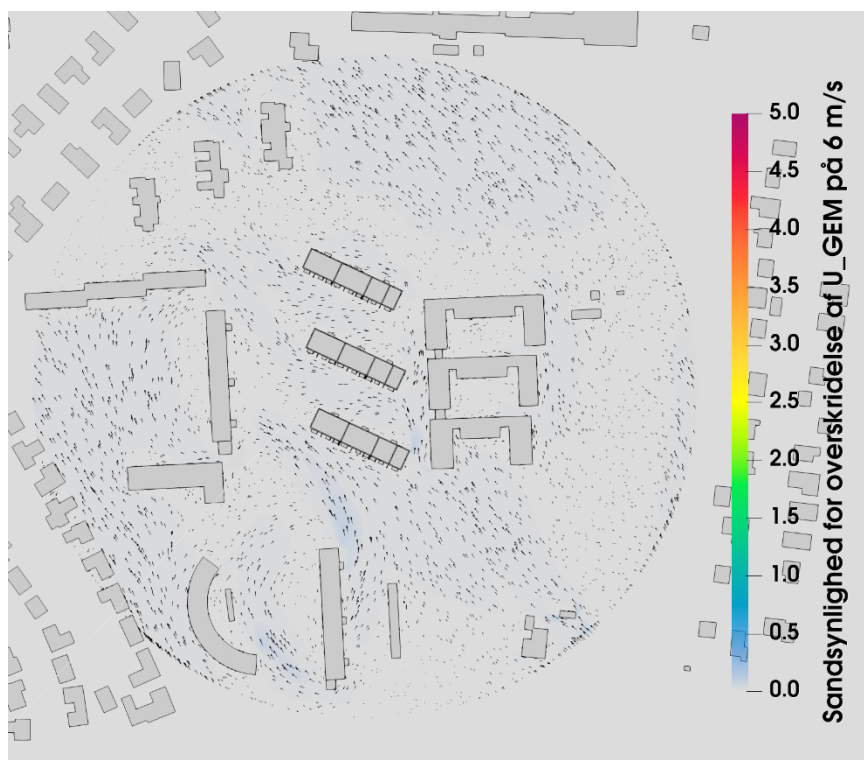
Figur E-10: Forstærkningsfaktor for vind fra øst.



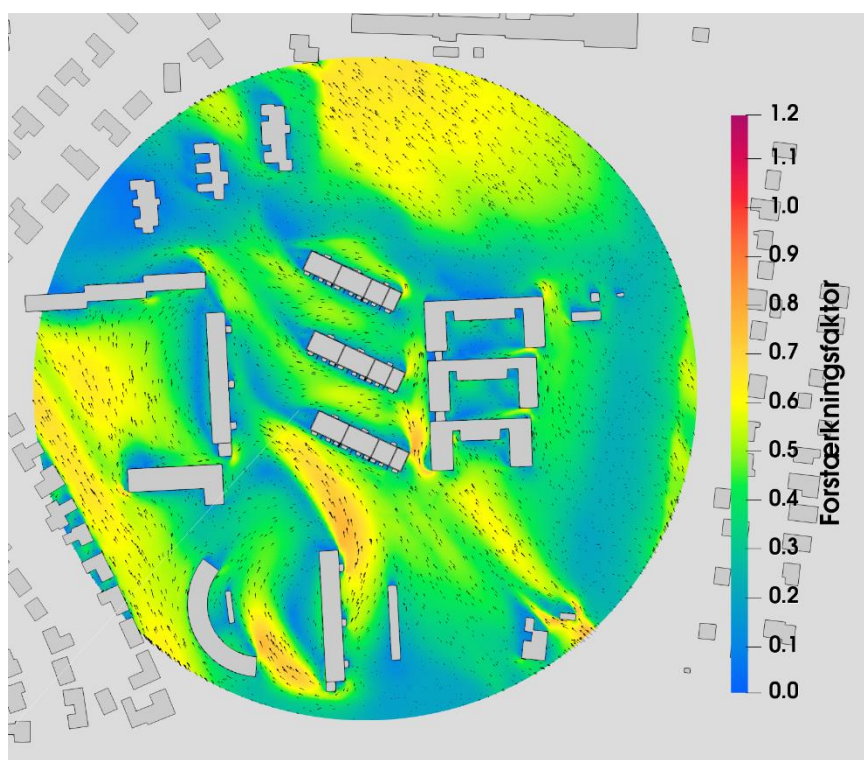
Figur E-11: Retningsbestemt sandsynlighed for overskridelse af komfortkriteriet på 6 m/s, øst-sydøst.



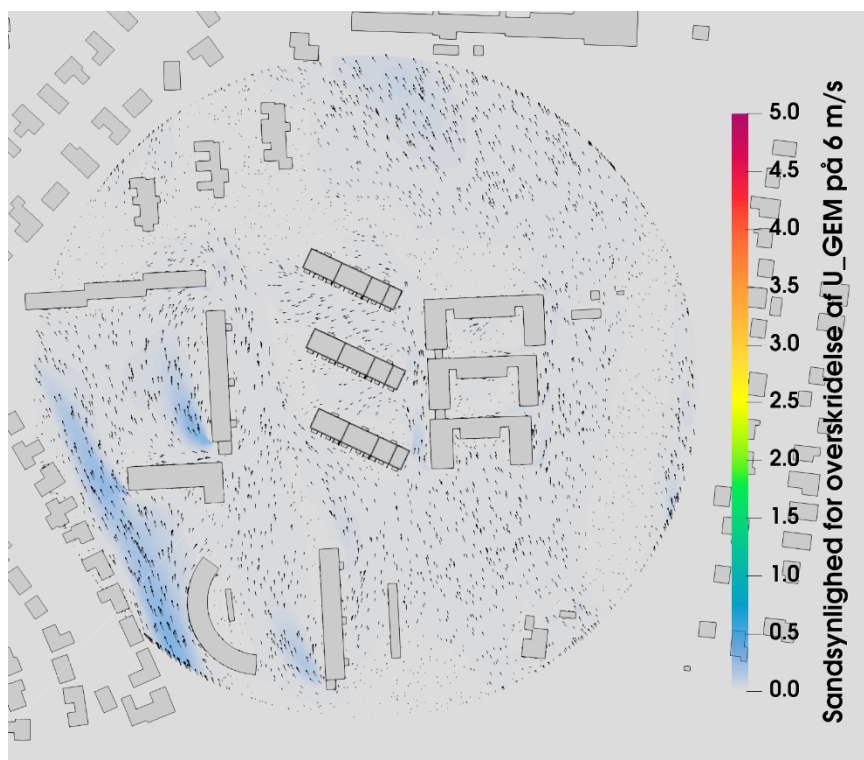
Figur E-12: Forstærkningsfaktor for vind fra øst-sydøst.



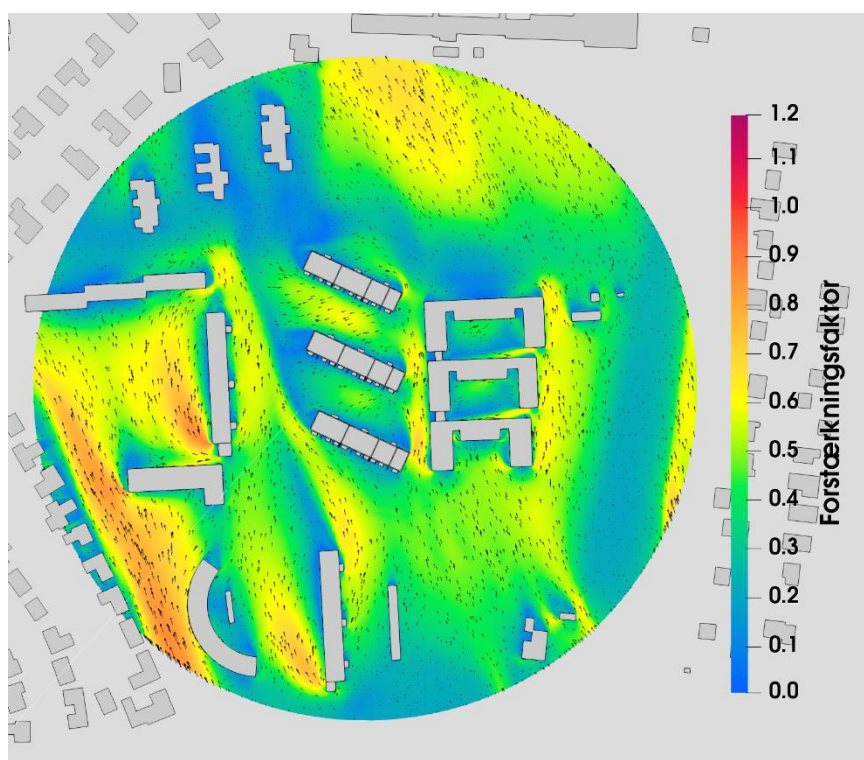
Figur E-13: Retningsbestemt sandsynlighed for overskridelse af komfortkriteriet på 6 m/s, sydøst.



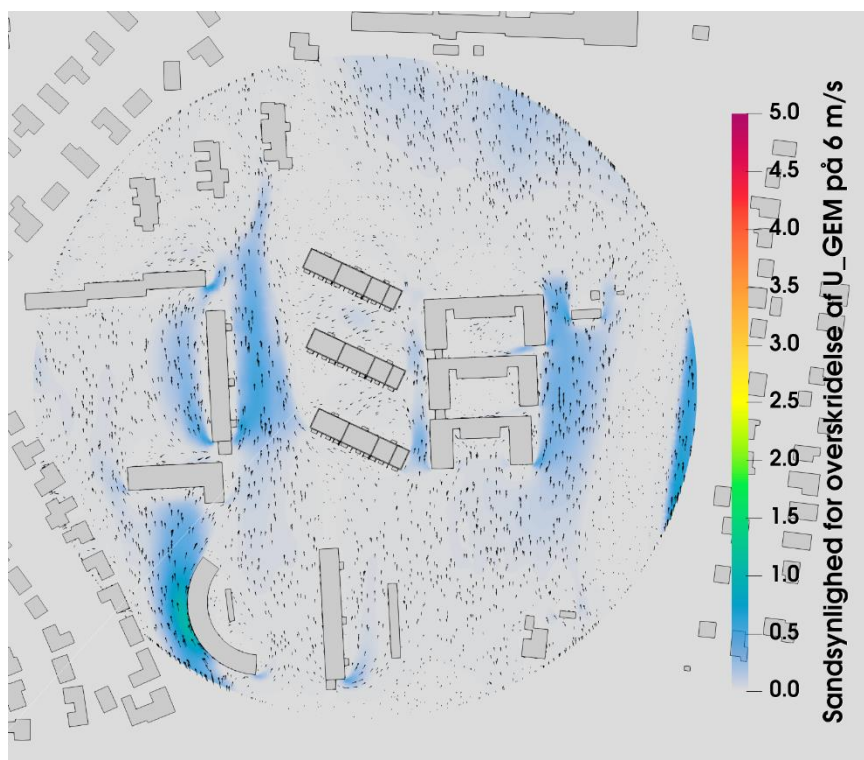
Figur E-14: Forstærkningsfaktor for vind fra sydøst.



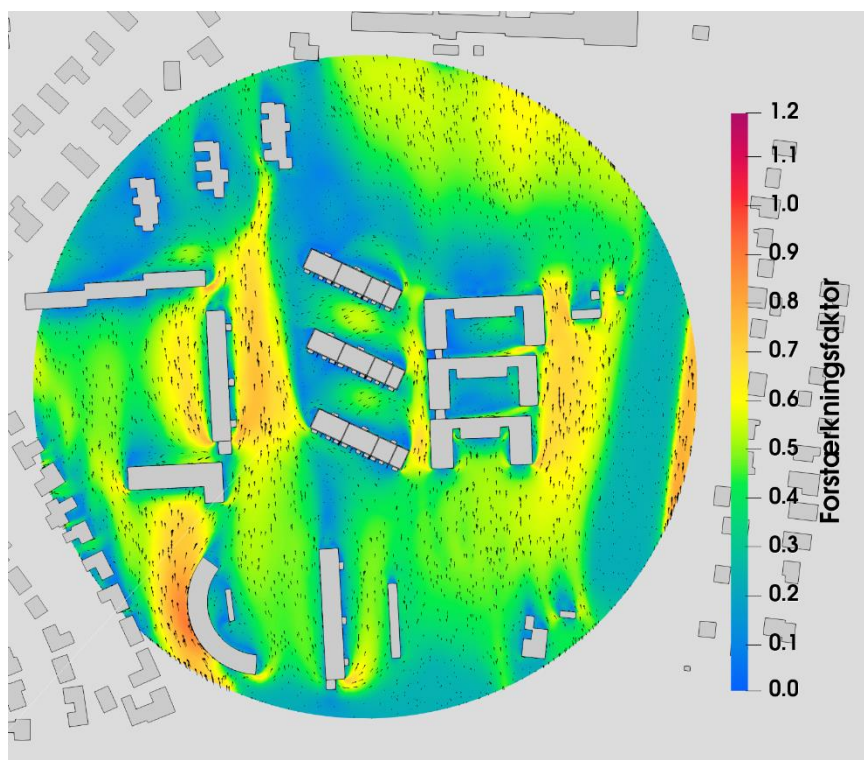
Figur E-15: Retningsbestemt sandsynlighed for overskridelse af komfortkriteriet på 6 m/s, syd-sydøst.



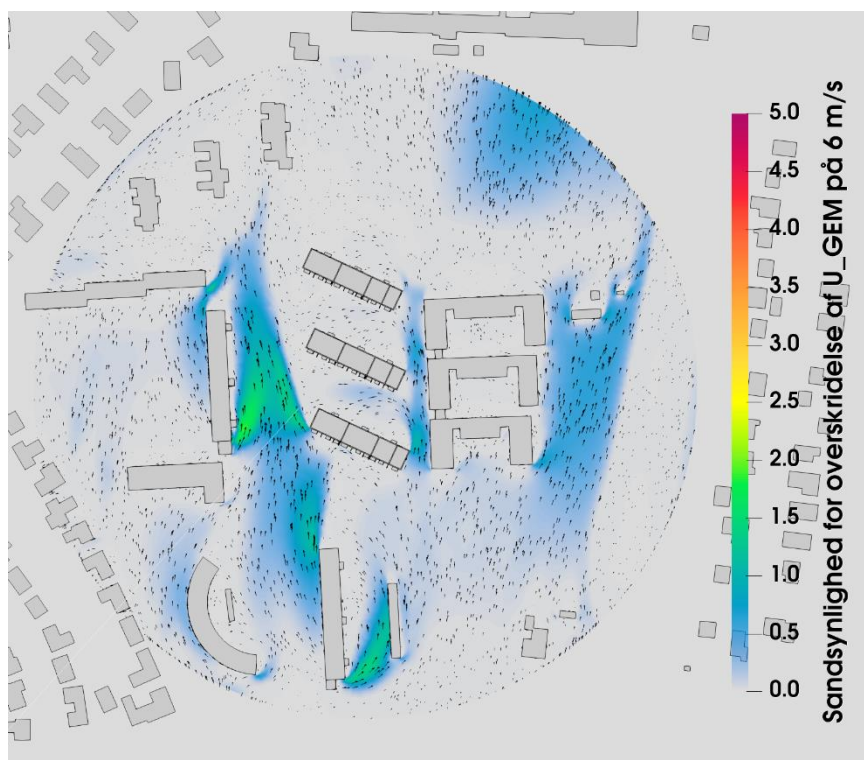
Figur E-16: Forstærkningsfaktor for vind fra syd-sydøst.



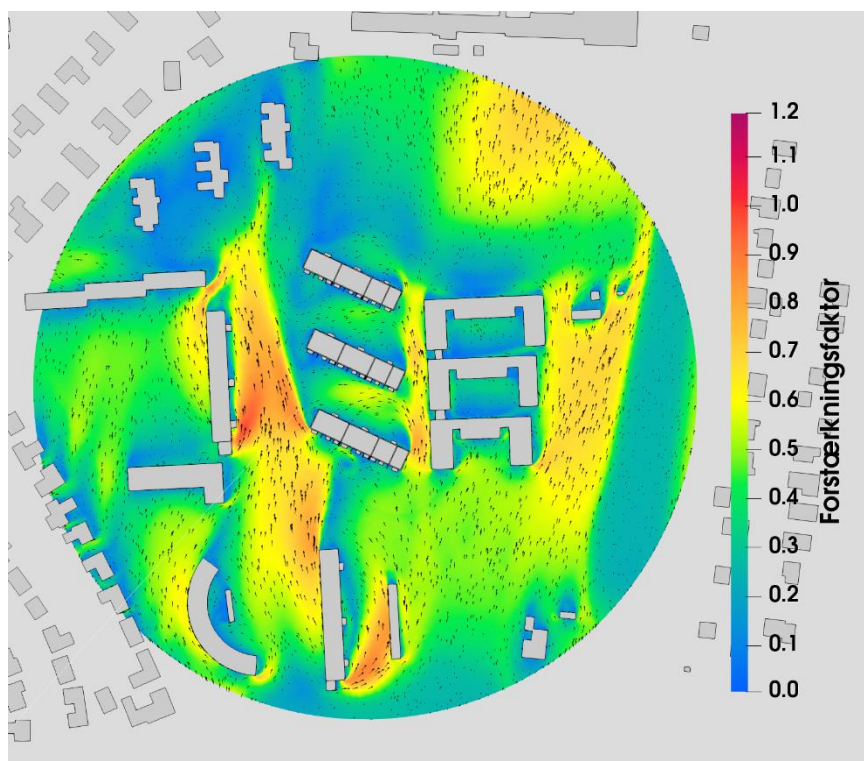
Figur E-17: Retningsbestemt sandsynlighed for overskridelse af komfortkriteriet på 6 m/s, syd.



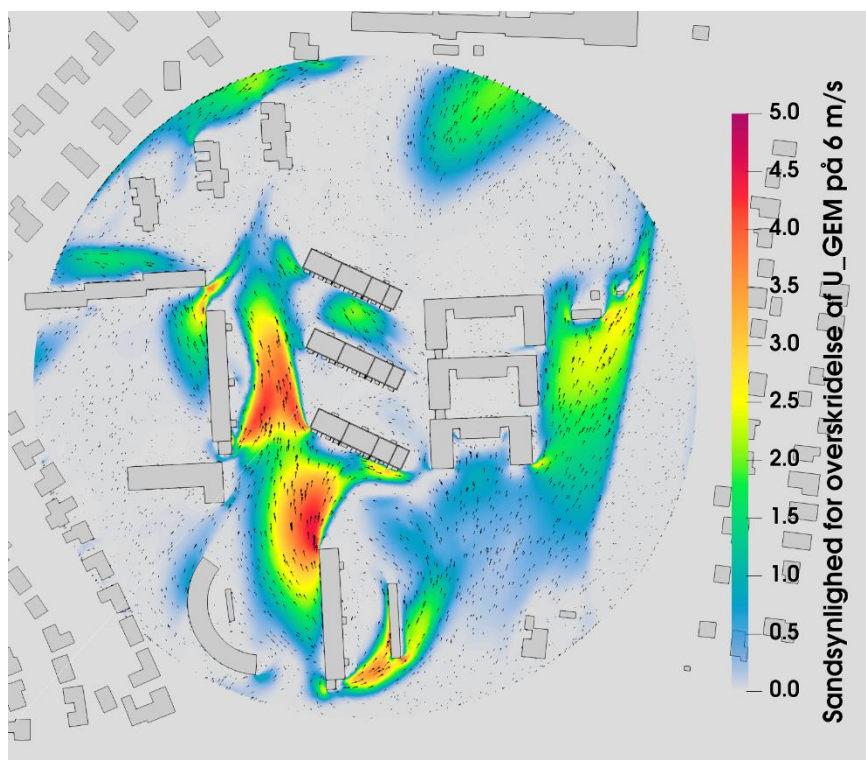
Figur E-18: Forstærkningsfaktor for vind fra syd.



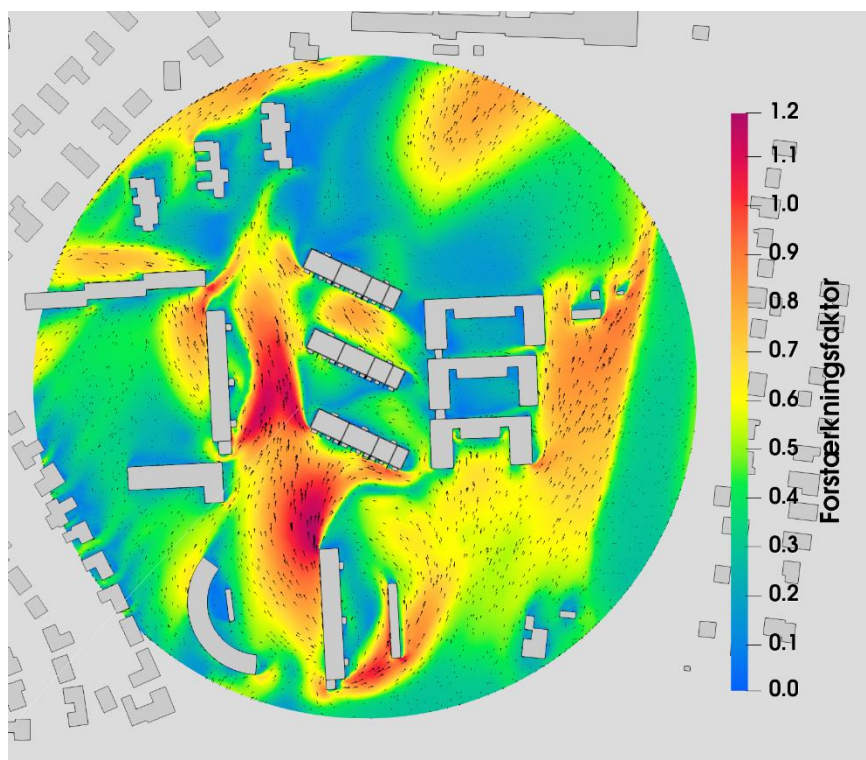
Figur E-19: Retningsbestemt sandsynlighed for overskridelse af komfortkriteriet på 6 m/s, syd-sydvest.



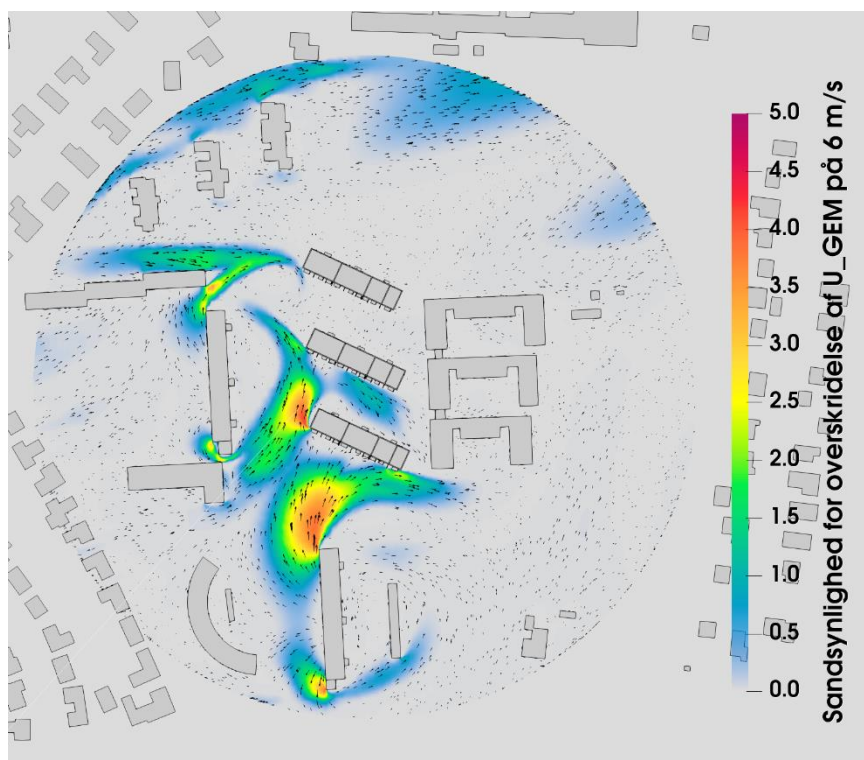
Figur E-20: Forstærkningsfaktor for vind fra syd-sydvest.



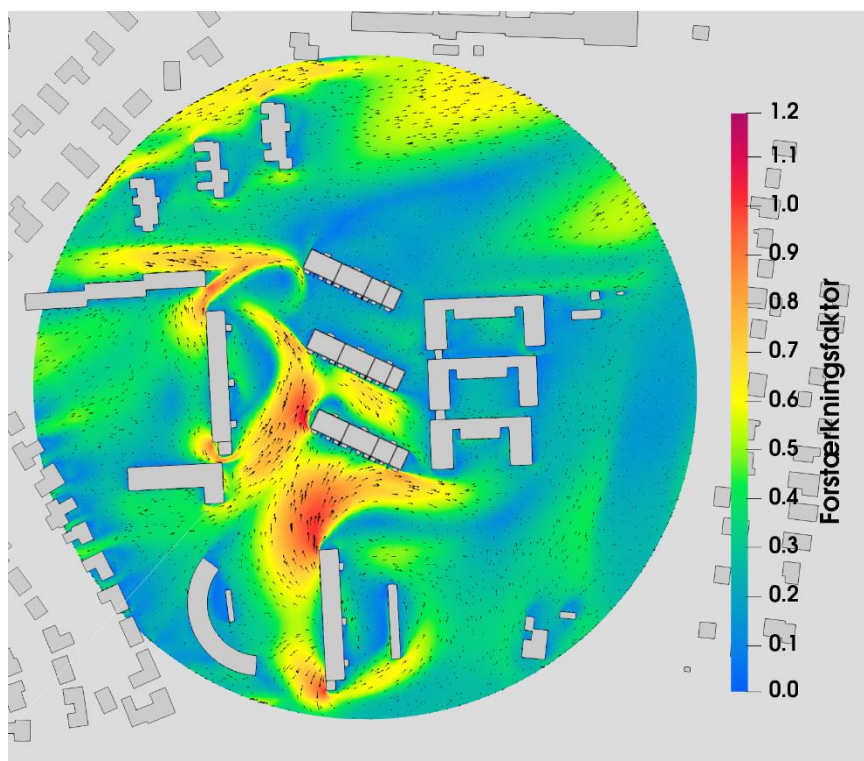
Figur E-21: Retningsbestemt sandsynlighed for overskridelse af komfortkriteriet på 6 m/s, sydvest.



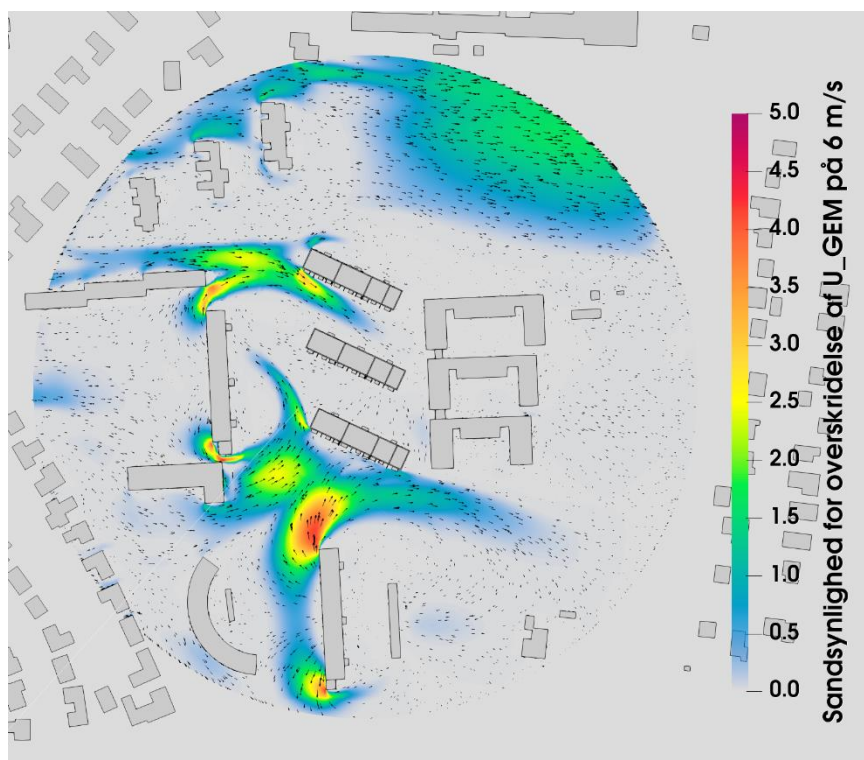
Figur E-22: Forstærkningsfaktor for vind fra sydvest.



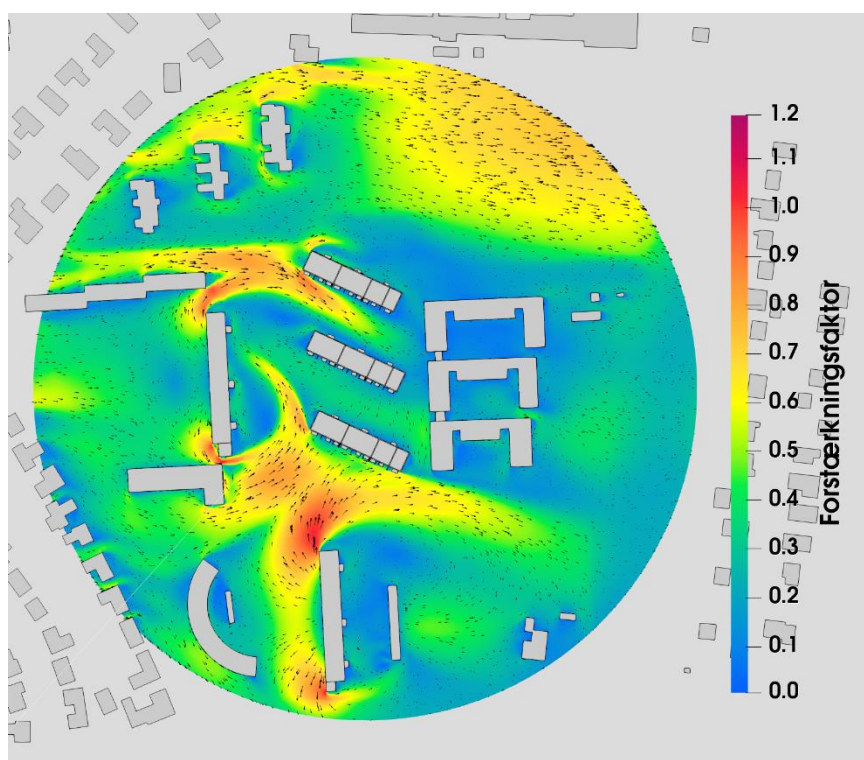
Figur E-23: Retningsbestemt sandsynlighed for overskridelse af komfortkriteriet på 6 m/s, vest-sydvest.



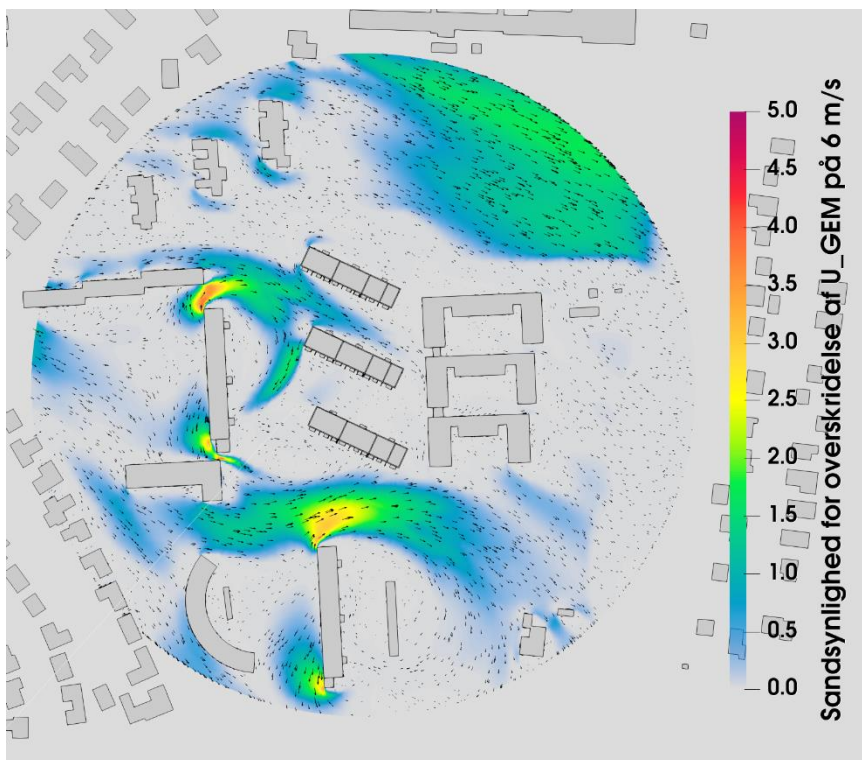
Figur E-24: Forstærkningsfaktor for vind fra vest-sydvest.



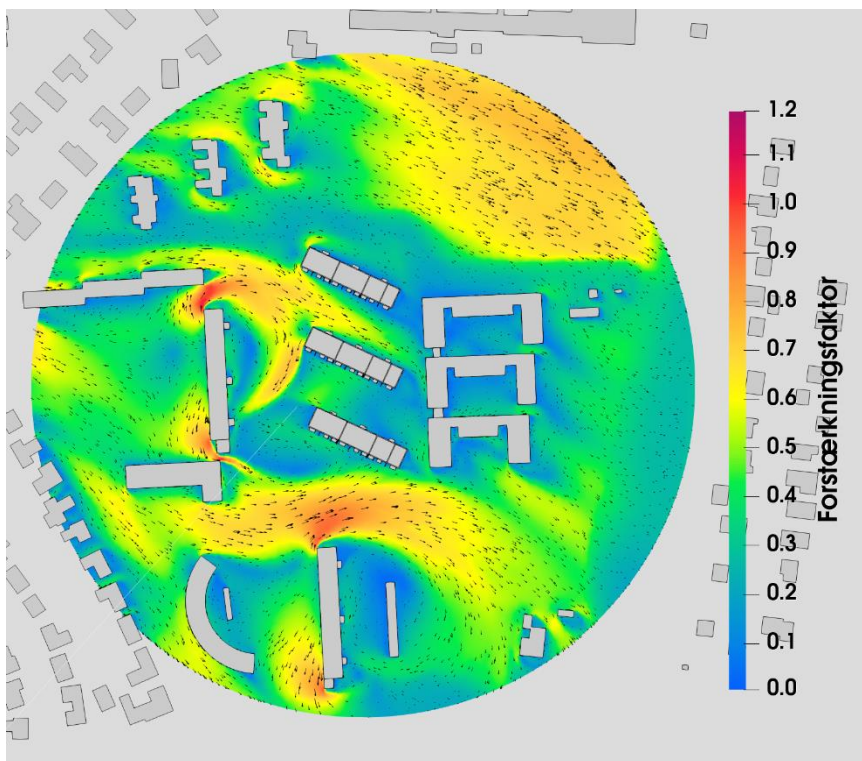
Figur E-25: Retningsbestemt sandsynlighed for overskridelse af komfortkriteriet på 6 m/s, vest.



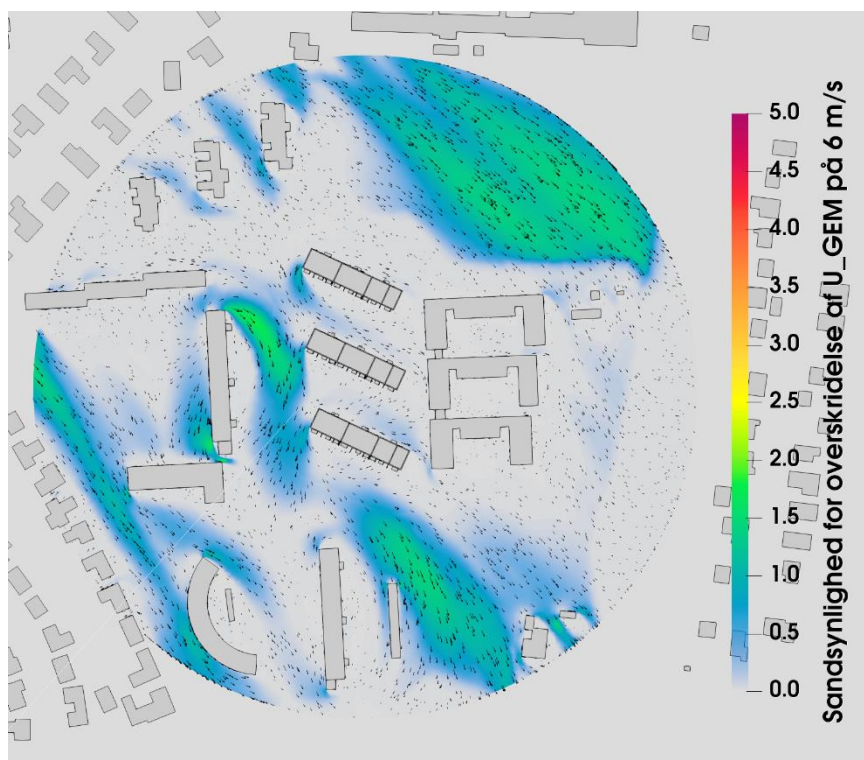
Figur E-26: Forstærkningsfaktor for vind fra vest.



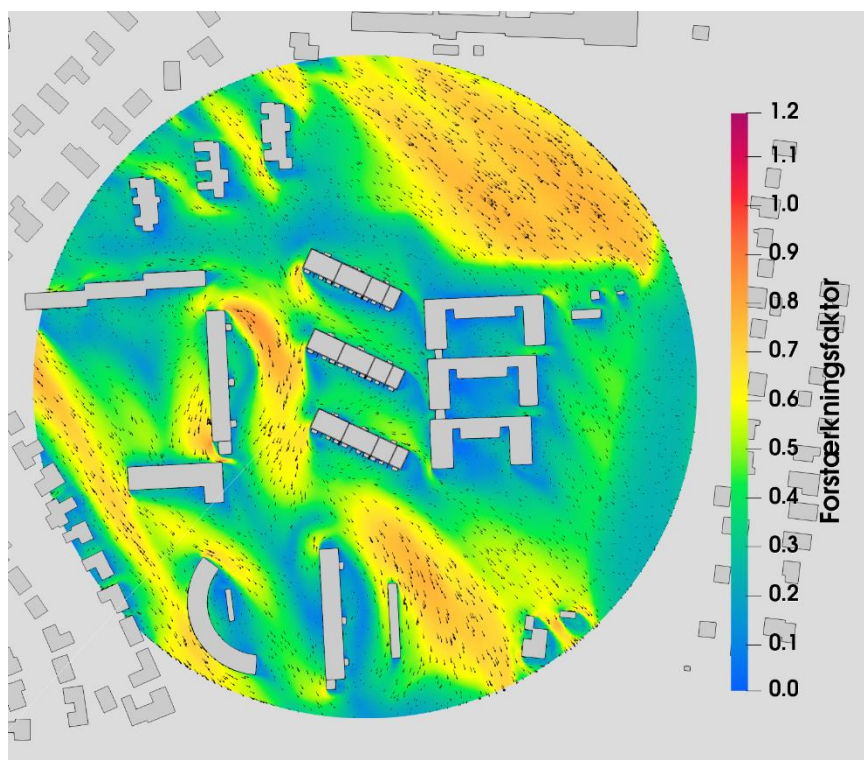
Figur E-27: Retningsbestemt sandsynlighed for overskridelse af komfortkriteriet på 6 m/s, vest-nordvest.



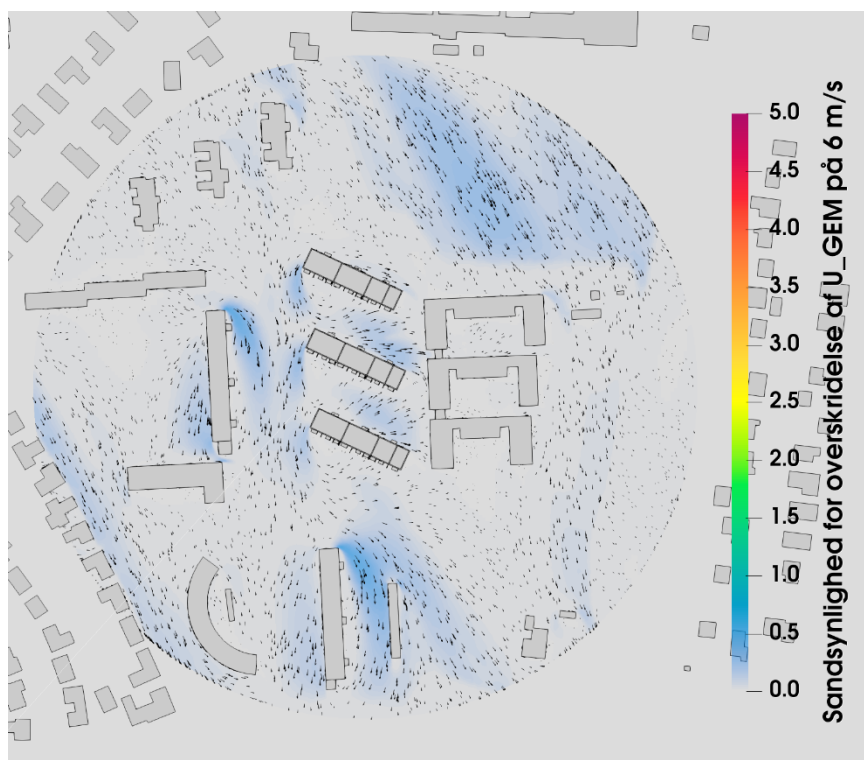
Figur E-28: Forstærkningsfaktor for vind fra vest-nordvest.



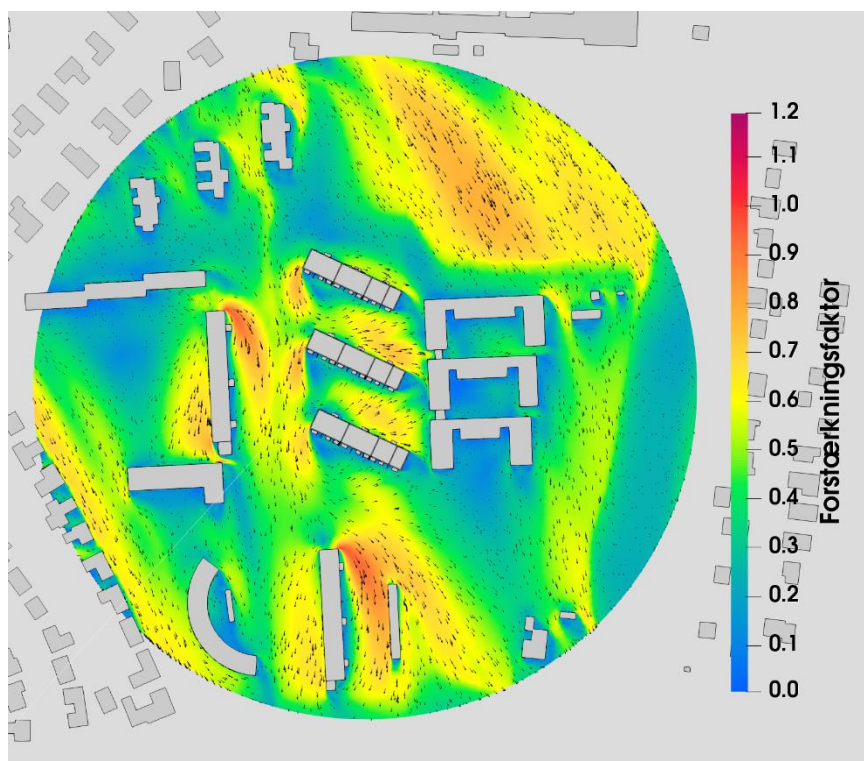
Figur E-29: Retningsbestemt sandsynlighed for overskridelse af komfortkriteriet på 6 m/s, nordvest.



Figur E-30: Forstærkningsfaktor for vind fra nordvest.



Figur E-31: Retningsbestemt sandsynlighed for overskridelse af komfortkriteriet på 6 m/s, nord-nordvest.



Figur E-32: Forstærkningsfaktor for vind fra nord-nordvest.