

Cedric van Gerwen, Sem Plasmeijer, Yorni Wartenberg,
Daan Rijnberk

Inhoudsopgaven.

1. Onderzoeksopzet.	2
1.1. centrale vraag.	2
1.2. deelvragen.	2
2. kwaliteitseisen.	3
2.1. Betrouwbaarheid.	3
2.2. Validiteit.	3
3. Theoretisch kader.	4
4. Wat zijn edge datacenters.	5
5. Behoeften analyse.	7
6. De noodzaak van Edge datacenters vanuit technologisch perspectief.	11
6.1.Huidige Problemen.	11
6.2. Latency Round-trip	11
6.3. 5G	12
6.4. Kan 5G de taak van edge computing overnemen?	13
6.5. 5G en Rotterdam.	13
6.5.1 Rotterdam en edge datacenters.	14
6.6 Edge Computing en zijn use cases	14
6.6.1 Technologie	14
6.6.2 Automotive.	14
6.6.3 Gezondheidszorg.	15
6.6.4 Industrie.	15
6.6.5 Lifestyle.	16
6.7 Conclusie Technologie.	16
7. Economisch verdienmodel Edge data centres (private partijen).	17
7.1. kosten en opbrengsten edge data centre.	17
8. Conclusie en aanbevelingen.	18
9. Bronnen.	20

1. Onderzoeksopzet.

In dit hoofdstuk wordt de leidraad van dit rapport inzichtelijk weergegeven. De hoofdvraag vormt de rode draag van dit adviesrapport. De deelvragen worden in verschillende hoofdstukken behandeld. Aan het einde van dit advies rapport worden conclusies en aanbevelingen aan de gemeente Rotterdam gegeven.

1.1. centrale vraag.

Welke rol gaan edge datacenters vervullen in de toekomstige digitale economie van Rotterdam? En hoe zou de gemeente zich hierop moeten voorbereiden?

1.2. deelvragen.

1. Wat zijn Edge data centres?
2. Is er behoefte aan Edge data Centres?
3. Zijn er milieuvoordelen bij het uitrollen van Edge data centres?
4. Zijn Edge Data centres vanuit technologisch perspectief noodzakelijk? (kijkende naar de vijf thema's)
5. Is er een verdienmodel voor private partijen om Edge data centres uit te rollen? (Kijkende naar de behoeften vs kosten/opbrengsten).

2. kwaliteitseisen.

Binnen dit hoofdstuk wordt omschreven hoe dit onderzoeksrapport is onderbouwt met gegevens. De betrouwbaarheid en validiteit van de opgenomen informatie wordt hier omschreven en onderbouwt.

2.1. Betrouwbaarheid.

Er is alleen gebruik gemaakt van gerenommeerde bronnen. Artikelen die geschreven zijn door professionals uit het werkveld binnen de ICT. De informatie komt met name van auteurs die artikelen geschreven hebben voor onafhankelijke en bonafide organisaties. Wetenschappelijke artikelen die geen winst oogmerk voor ogen hebben en alleen bezig zijn geweest met empirisch onderzoek naar nieuwe technologieën. Een voorbeeld van een organisatie die veelvuldig in dit rapport is verwerkt betreft Elsevier. Verder zijn er twee interviews gehouden met professionals uit het Werkveld. Er is contact opgenomen met de heer Martin Prins en Jim Walda. Beide professionals in het werkveld van ICT e.d. De heren hebben beide hun visie geprojecteerd aangaande de verwachtingen of er de komende jaren, sprekende over een decennium, behoefte is aan Edge datacentres. Beide hebben een onderbouwing gegeven van de huidige technologieën aangaande 5G en (in beperkte mate) glasvezel. Wat de huidige bandbreedte en latency betreft en voor welke sectoren dit voorlopig voldoende is de komende tien jaar.

2.2. Validiteit.

Er is met name gemeten wat de huidige snelheid betreft van 5G en glasvezel. Welke sectoren, omschreven aan de hand van 5 thema's, innovaties ondervinden die een super low latency en hoge bandbreedte nodig hebben. Daarbij of er de komende tien jaar voldoende snelheid en bandbreedte is voor de technologieën die in dit tijdsbestek zich zullen ontwikkelen. Het betreffen bevindingen die gestoeld zijn op een verwachtingspatroon vanuit professionals binnen de ICT. Hetgeen dat kan afwijken van de werkelijkheid. Er is een eenzijdig beeld binnen dit onderzoeksrapport ontstaan vanuit professionals binnen de ontwikkelingen rondom internet, 5G en glasvezel. De vijf genoemde thema's en diens ontwikkelingen zijn beperkt omschreven door tekortkoming in persoonlijke communicatie. Professionals binnen de genoemde thema's waren niet bereikbaar gedurende de periode van dit onderzoek. De thema's zijn enkel en alleen vanuit deskresearch omschreven en kennen geen praktijkgerichte voorbeelden en bevestigingen. Een oppervlakkige omschrijving van de toekomstige ontwikkelingen worden geboden. Hoe het staat met de adoptie binnen de genoemde sectoren is met alleen deskresearch lastig te achterhalen.

3. Theoretisch kader.

Binnen dit hoofdstuk worden een aantal begrippen toegelicht. Begrippen die nodig zijn om de rest van het rapport goed te kunnen begrijpen.

Edge datacenter

Edge-datacenters zijn kleine datacenters die zich dicht bij de rand van een netwerk bevinden. Ze bieden dezelfde apparatuur als in traditionele datacenters, maar in een kleinere ruimte, dicht bij de eindgebruikers en apparaten (TechTarget, 2020).

5G

5G is het mobiele netwerk van de vijfde generatie. Het is een nieuwe wereldwijde draadloze standaard na 1G-, 2G-, 3G- en 4G-netwerken en is bedoeld om hogere snelheden, ultra lage latency, meer betrouwbaarheid, massale netwerkcapaciteit, grotere beschikbaarheid en een meer uniforme gebruikerservaring aan gebruikers te leveren (Qualcomm, z.d.).

5G NR

5G New Radio (NR) is de wereldwijde standaard voor een eenduidige, meer capabele 5G draadloze air interface. Het moet zorgen voor aanzienlijk snellere en responsievere mobiele ervaringen (Qualcomm, z.d.).

Internet of Things

Verbonden objecten en apparaten (ook wel "dingen" genoemd) die zijn uitgerust met sensoren, software en andere technologieën waarmee zij gegevens kunnen verzenden en ontvangen (SAP, z.d.).

Smart Cities

Een slimme en duurzame stad maakt gebruik van informatie- en communicatietechnologieën (ICT) om de levenskwaliteit, de efficiëntie en het concurrentievermogen te verbeteren en er tegelijkertijd voor te zorgen dat de stad voldoet aan de behoeften van de huidige en toekomstige generaties. (Enelx, z.d.).

Latency

Latency is de tijd dat een gegevenspakket nodig heeft om van de ene plaats naar de andere te gaan. Het verlagen van de latency is een belangrijk onderdeel van het opbouwen van een goede gebruikerservaring van een netwerk. (Cloudflare, z.d.).

Real-time data

Real-time data zijn datagegevens die beschikbaar zijn zodra ze worden gecreëerd en verkregen. Gegevens worden niet opgeslagen, maar worden naar gebruikers doorgestuurd zodra ze zijn verzameld en zijn onmiddellijk beschikbaar zonder enige vertraging (Splunk, 2021).

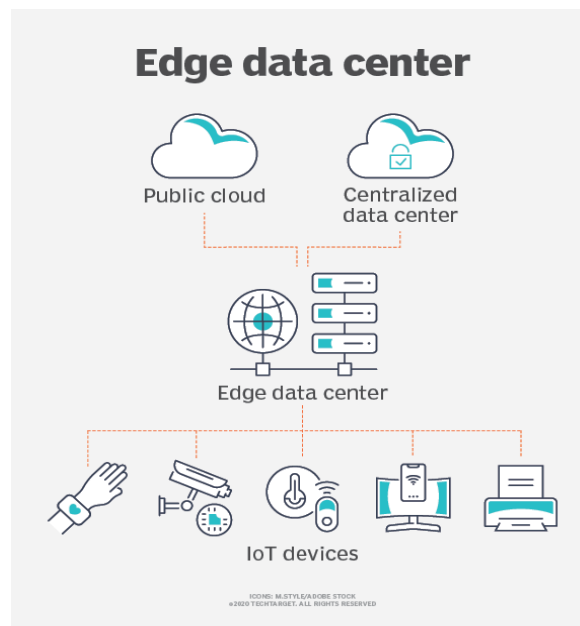
Digital twin

Een digital twin is een virtuele voorstelling van een object of systeem die wordt bijgewerkt aan de hand van realtimegegevens en gebruik maakt van simulatie, machinaal leren en redeneren om besluitvorming te ondersteunen (IBM, z.d.).

4. Wat zijn edge datacenters.

Edge datacenters zijn kleinere versies van de alom bekende mega datacenters die op meerdere plekken in Nederland staan en beheerd worden. Deze mega datacenters zijn veelal eigendom van de grote cloud providers Google en Microsoft. Edge datacentres zijn daarentegen privaat eigendom, klein in omvang en worden aan de rand van een netwerk geplaatst. Bijvoorbeeld aan de rand van een gebouw of aan de rand van een wijk. Door de kleine omvang zijn ze makkelijk in de buurt van de gebruiker of diens apparaten te plaatsen. Hiermee wordt de reistijd van data verkort. In principe werken deze datacenters dus hetzelfde als traditionele datacenters, maar in een kleinere vorm en dicht bij het doel. Door de snellere reistijd zijn er nieuwe toepassingen met deze datacenters mogelijk in vergelijking tot de traditionele varianten. Edge datacenters kunnen van toepassing zijn voor diensten of processen waar een snelle reactie is vereist. Het meest voor de hand liggende voorbeeld hierbij zijn autonoom rijdende voertuigen. (Sunbird DCIM, z.d.)

Het concept van edge datacenters is gebaseerd op edge computing. Dit is een IT design dat er op gericht is het punt van dataverwerking zo dicht mogelijk bij de apparaten van de gebruiker te zetten. Zodoende ervoor te zorgen dat taken sneller uitgevoerd kunnen worden met een minimale latency. Met deze minimale latency kan tijdsgevoelige data sneller worden verstuurd en verwerkt.



In de basis werkt een edge datacenter als een connectie tussen twee netwerken. In de meeste gevallen is dit een apparaat of sensor én een groter datacenter. Waar een edge datacenter op zich als losstaande datacenter kan werken is deze meestal vooralsnog verbonden met een grotere datacenter. Dit zorgt namelijk voor een betere verwerking van de grote hoeveelheden data. Edge datacenters zijn vaak verantwoordelijk voor hun eigen netwerk. In een stad zullen er in dat geval meerdere van deze datacenters aanwezig zijn. Bij voorkeur staan er ook meerdere datacenters per netwerk voor effectieve verwerking van data.

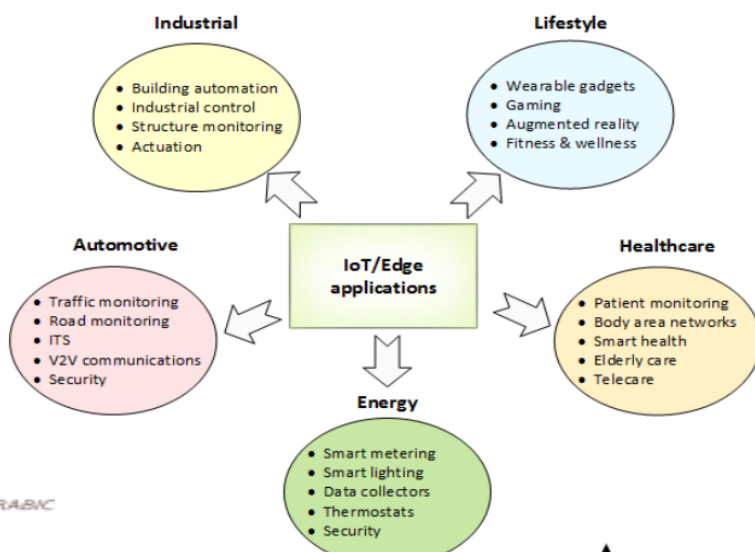
Naast dat ze zorgen voor een lagere latency bieden ze nog een aantal voordelen. Het verbetert namelijk ook de bandbreedte van het netwerk. Doordat de data lokaal wordt verwerkt wordt het datavolume en dataverkeer naar centrale servers verminderd. Hierdoor komt er meer bandbreedte beschikbaar en vermindert het de druk op de performance van het netwerk. Daarnaast verbeteren

edge datacenters tevens de veiligheid van data. Door minder dataverkeer worden gevoeligheden verminderd en is er minder kans op datalekken.

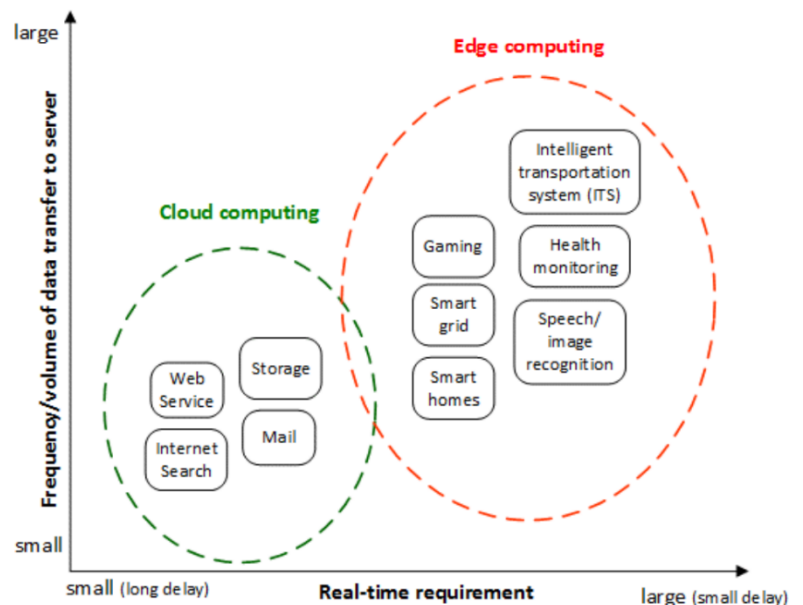
Er zijn 2 hoofdtypen edge datacenters. Dit zijn metro edge, die geplaatst kunnen worden overal in een wijk of stad. De andere type is mobile edge, die aan de basis van internetmasten staan. De metro edge datacenters zijn er om mensen en apparaten toegang te geven tot telecom-, internet- en cloud diensten. De mobile edge datacenters zorgen voor een goede IT-infrastructuur. Deze datacenters zijn vaak niet groter dan 1m2 en worden door glasvezel met metro edge datacenters verbonden. Het zijn de metro edge datacenters die het meest voorkomen aangezien deze overal in de stad geplaatst kunnen worden. Deze datacenters hebben een bereik van ongeveer 5 km. (Zhang, 2022)

5. Behoeften analyse.

De servers die op heden worden gebruikt zijn "Geo-distributed data centres. Grote datacenters die vaak ver van de bewoonde wereld zijn gealloceerd. Een nadeel is dat er een zogeheten "latency", in het Nederlands: vertraging, van een paar seconden plaatsvindt tussen de zender en ontvanger. De behoefte aan Edge data centres komt van sectoren waarbij het cruciaal is dat er nauwelijks tot geen vertraging plaatsvindt binnen de uitwisseling van data. Een behoefte aan zogenoemde Real-time data is groeiende. De belangrijkste sectoren die behoeften hebben aan dergelijke real-time data, mogelijke gemaakt middels Edge datacenters, zullen in dit hoofdstuk geanalyseerd worden. Figuur 1 bied een overzicht van de verschillende sectoren en diens toepassingen. Figuur twee verbeeld de nut en noodzaak van edge data centres per toepassing. (Bilal at al. 2018)



Figuur 1: SEQ
Figuur 1: ARABAC
1



Figuur 1 en Figuur 2. Potential application areas of edge computing. Overgenomen uit Potentials, trends, and prospects in edge technologies: Fog, cloudlet, mobile edge, and micro data centers. Computer Networks, 130, 94-120. 2018,

https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1389128617303778?casa_token=r8nRyl8GkWsAAAAA:0lCgcov-pPZ3_tdGgIUktHf4T5k67a-F3Dteof1trQ0n7wNh0Wnol8zTh_Ngh8Pi5IKu2RVTFa

Copyright 2018.

Technologie:

Edge datacenters zullen een cruciale rol spelen in de verwerking van data welke verzameld wordt in een smart city. Het gaat dan om het verzamelen en verwerken van data over bijvoorbeeld het verkeer en infrastructuur waarop technologie zoals stoplichten en informatieborden kunnen handelen. Er ontstaan steeds meer IoT toepassingen waaronder sensoren, camera's en nog veel meer. De grote hoeveelheid data op zich zorgt voor veel overbelasting van het huidige netwerk en de ontwikkeling binnen IoT zijn nog verre van klaar. Veel van deze data kan tijdsgevoelig zijn en hier komen edge datacenters in het spel. Deze zorgen dat de data sneller verwerkt kan worden en in grotere hoeveelheden. Voor 5G kunnen Edge datacenters helpen in gebieden waar veel mensen (apparaten) zich samen bevinden. Door deze datacenters wordt het 5G netwerk versterkt en indirect ondersteunt waardoor deze meer belasting van het netwerk aankan. Daarbij zijn beveiligingscamera's steeds vaker in het straatbeeld te vinden. Deze zijn steeds vaker uitgerust met moderne technologie zoals gezichtsherkenning of bewegingssensoren. Dit zorgt voor enorme hoeveelheden aan data welke lokaal verwerkt dienen te worden met het oog op privacy. Hierin zullen edge datacenters dus ook in de toekomst een grote rol spelen.

Automotive:

Het verkeer van de toekomst rijdt autonoom en heeft geen menselijke handelingen nodig om zich van A naar B te verplaatsen. Met behulp van Cloud Computing en toepassingen van slimme connectiviteit, kan data uitgewisseld worden tussen het desbetreffende voertuig en de servers waar de data wordt verwerkt en opgeslagen. Voor autonoom verkeer is het cruciaal dat er geen enkele vertraging plaatsvindt in de uitwisseling van informatie tussen zender en ontvanger. De vertraging moet minimaal zijn. Seconden vertraging in het verkeer kunnen leiden tot hectiek en ongelukken. (Aujla et al. 2019). Het toepassen van Edge data centers maakt het mogelijk verkeer beter en accurater te monitoren en te stroomlijnen. Technologieën die reisbewegingen detecteren kunnen hierdoor beter worden toegepast. Wanneer een stad als Rotterdam klaar wil zijn voor toekomstig autonoom verkeer, zullen er toepassingen moeten komen die real-time data mogelijk maakt.

In een rapport van de Wetenschappelijke Raad voor het Regeringsbeleid heeft men de technologische trends en ontwikkelingen binnen de mobiliteit afgezet op het huidige Nederlandse ecosysteem. Men schrijft dat er voor autonoom rijden met name aandacht besteed moet worden aan "communicatie en signalen, actuele hoge definitie kaarten en cybersecurity." (Bakker et al. 2021). Wanneer de nieuwe technologieën (sensoren) om autonoom rijden mogelijk te maken ingebed moeten worden in het voertuig zelf, kan dit leiden tot een economisch onrendabel product. Wanneer deze technologieën binnen de infrastructuur zal plaatsnemen, is het noodzakelijk dat men vanuit het ministerie van infrastructuur en Rijkswaterstaat een methodologische ontwerpkeuze ontwikkelt. (Bakker et al. 2021).

Gezondheidszorg:

Verschillende toepassingen binnen de moderne gezondheidszorg vereist real-time data verkeer. Wanneer bijvoorbeeld artsen op afstand willen opereren of gebruik maken van robotica, is een lage latency een vereisten. Robotica kunnen middels algoritme en artificial intelligence handelingen van artsen overnemen. Robots zullen in de toekomst een belangrijk onderdeel zijn van de gezondheidszorg. Zij kunnen diagnoses stellen en medische ingrepen verrichten. Robotica heeft communicatie nodig, over en weer data ophalen en verzenden. (Wan et al. 2020). Daarbij zal de gezondheid van mensen constant gemeten worden door slimme apparatuur en applicaties. Health apps en geïntegreerde technologieën in wearables maken het mogelijk gemakkelijker diagnoses te stellen door de monitoring van diens leefstijl.

De voorspelling voor de Nederlandse gezondheidszorg is dat, er door vergrijzing en een ongezonde levensstijl, steeds meer mensen last krijgen van chronische aandoeningen. Aandoeningen als dementie en diabetes. Met name de uitwisseling van data tussen de verschillende zorginstellingen in

Nederland wordt een uitdaging. Ondersteunende data-infrastructuur zijn voor de zorginstellingen van groot belang. Het moet voor de zorg gemakkelijker worden data op te slaan en deze met andere instellingen te delen. Vooral veiligheid en privacy is cruciaal bij het genereren en delen van data. Dit aangezien het uiterst persoonlijke gegevens van individuen betreft. (Bakker et al. 2021).

Industrie:

De industrie is aan verandering onderhevig. Men spreekt ook wel van "industrie 4.0". Het betreft een modernisering in de maakindustrie aangaande de adaptatie van nieuwe technologieën uit de ICT. Gedacht kan worden aan communicatiesystemen en protocollen, cyber security, Artificial intelligence (AI)- methoden enzovoorts. Het productieproces kan op deze wijze worden verbeterd. Er is sprake van een efficiëntieslag door gebruik te maken van deze technologieën. Data gedreven werken waardoor machines prognoses kunnen maken over de behoefte naar het te realiseren product, is het nieuwe credo. Alsmede het corrigeren van de foutmarges middels AI, dat alsmaar minder wordt door het proces constant te monitoren door machine learning. Het analyseren van deze zogenoemde gedragingen binnen het productieproces genereren een boel data. Data die snel opgeslagen en opgehaald moet kunnen worden voor een adequate en snelle respons van machines. Ook hierbij geldt dat real-time data belangrijk is voor de juiste werking van nieuwe technologieën. (Diez-Olivan et al. 2019).

De Nederlandse industrie staat voor de uitdaging om de nodige ondersteunende infrastructuur op te tuigen. Men beschikt al over de nodige sensoren en meet- en regeltechnieken. Er is al behoorlijk wat data beschikbaar. Echter is het van belang dat men de hoeveelheden data goed kan laten ontsluiten door middel van data platforms en standaarden. Daarbij is het van belang dat er de nodige maatregelen komen om de veiligheid van de datastromen te waarborgen. Nóg een andere complementaire technologie voor de realisatie van autonome fabrieken is digital twinning. (Bakker et al. 2021).

Lifestyle:

Het dagelijks leven van het merendeel van de Nederlandse bevolking, ziet er in een afzienbare tijd anders uit. Toepassingen waarbij steeds meer gadgets en applicaties worden gebruikt hebben real-time data nodig. Daarbij kan gedacht worden aan slimme toepassingen binnenshuis alsmede rondom de woning. Een aantal voorbeelden die heden ten dage al gebruikt worden zijn: slimme lampen, slimme thermostaten en camerabewaking. Nog niet te spreken over thuiswerken waarbij vaak op afstand wordt vergaderd. Daarbij is het voor entertainment ook belangrijk dat er geen latency optreedt. Online gaming wint al jaren aan populariteit. Wanneer games complexer worden, vraagt dit om een betere connectiviteit waarbij Edge Datacenters kunnen ondersteunen bij de verwerking van grote datastromen. Daarbij is Augmented Reality een toekomstige trend. Het is in opkomst en grote technologiebedrijven zoals Meta en Apple werken er hard aan. De vraag is nog grotendeels wat er precies mee gedaan kan worden, maar de mogelijkheden zijn in ieder geval groot. Veel winkelketens zijn al aan het kijken hoe zij AR kunnen toepassen om te zorgen voor een betere winkelervaring. AR vereist real-time data verwerking en als dit in grote hoeveelheden moet gebeuren, dan zijn edge datacenters hierin cruciaal. (Wang et al. 2019)

Milieu (energie):

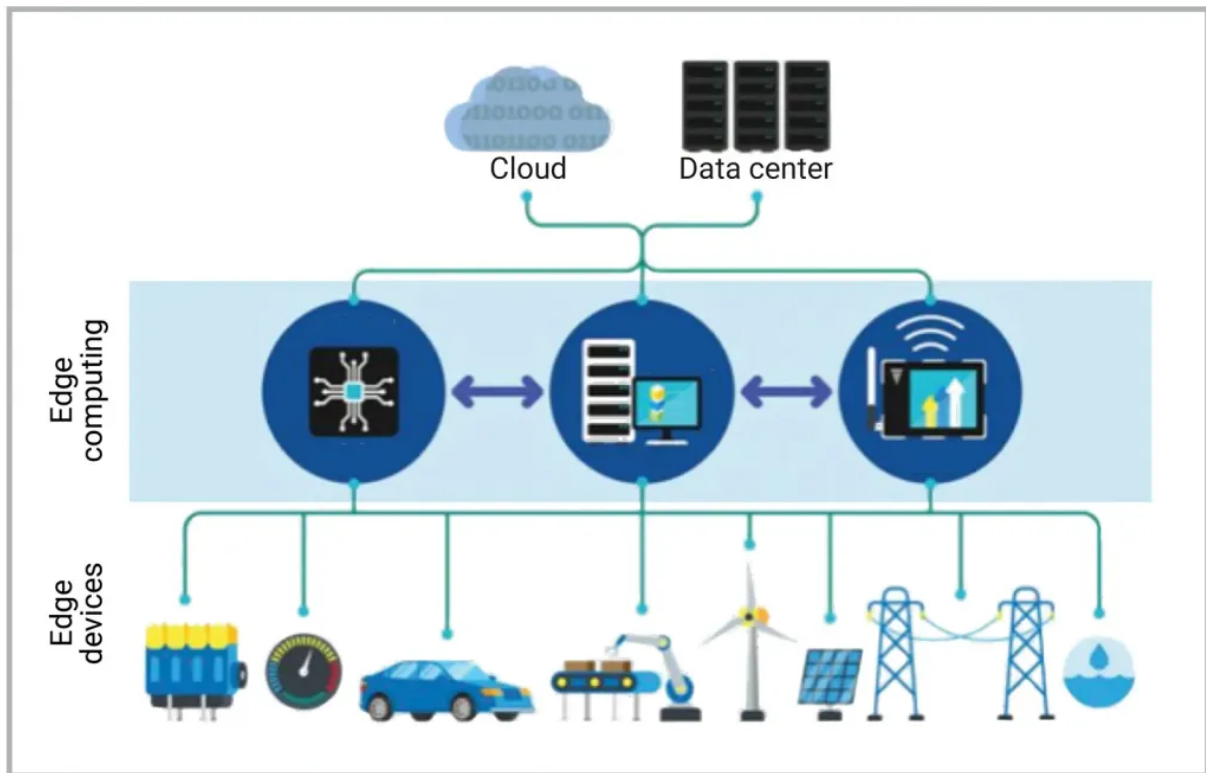
Datacenters gebruiken tegenwoordig ongeveer 3% van het totale wereldwijde stroomverbruik en zorgen voor 2% van de CO2 uitstoot. Waar grote datacenters vaak voldoende zijn om vele duizenden of zelfs miljoenen mensen te voorzien van opslag en diensten, zijn deze niet altijd geoptimaliseerd op energie verbruik. Edge datacenters zullen hoogstwaarschijnlijk niet hoeven omgaan met veel variatie aan data en duidelijk drukke en rustige momenten kennen. Hierdoor zijn deze kleinere datacenters efficiënter doordat deze mogelijk uitgeschakeld kunnen worden op momenten waarop zij minder hard nodig zijn en een enkele datacenter misschien het werk kan doen van drie. (Edge Computing, Insights, IoT, Sync, 2022)

De grootste hoeveelheid aan energie voor datacenters is nodig om deze te koelen. Edge datacenters worden genoemd als minder energie hongerig, doordat energie voor koelen minder is door de belasting en het formaat. Op dit moment is 40% van het energieverbruik bedoeld voor het koelen. Doordat Edge datacenters zorgen voor minder belasting van het netwerk en minder inspanning van het netwerk is het indirecte effect dat het resulteert in minder energieverbruik over de gehele cycle. (Edge Computing, Insights, IoT, Sync, 2022)

Tegen de bovenstaande positieve punten in, moet er niet vergeten worden dat het een feit is dat het installeren van Edge datacenters voor meer apparatuur zorgt. Hierdoor meer energieverbruik over de hele cloud industrie. Vanuit dit oogpunt is het cruciaal dat het voordeel van edge datacenters zo aanzienlijk is dat het te verantwoorden is tegen de extra hoeveelheid aan energie dat deze zullen kosten. Dit is zeker een punt om over te discussiëren in een tijd waarin energievoorziening niet vanzelfsprekend is. (STL Partners, 2022)

6. De noodzaak van Edge datacenters vanuit technologisch perspectief.

Al eerder zijn in dit rapport de grote voordelen die edge computing en edge datacenters met zich meebrengen omschreven. Maar wat zijn de redenen dat het huidige systeem een hogere totale vertraging heeft? Hoe lost edge computing dit probleem op? Wat zijn daarbij de effecten van 5G en hoe ondersteunt het edge datacenters?



<https://semiengineering.com/how-ai-in-edge-computing-drives-5g-and-the-iot/> Figure 1: Edge computing moves cloud processes closer to end devices by using micro data centers to analyze and process data.

6.1. Huidige Problemen.

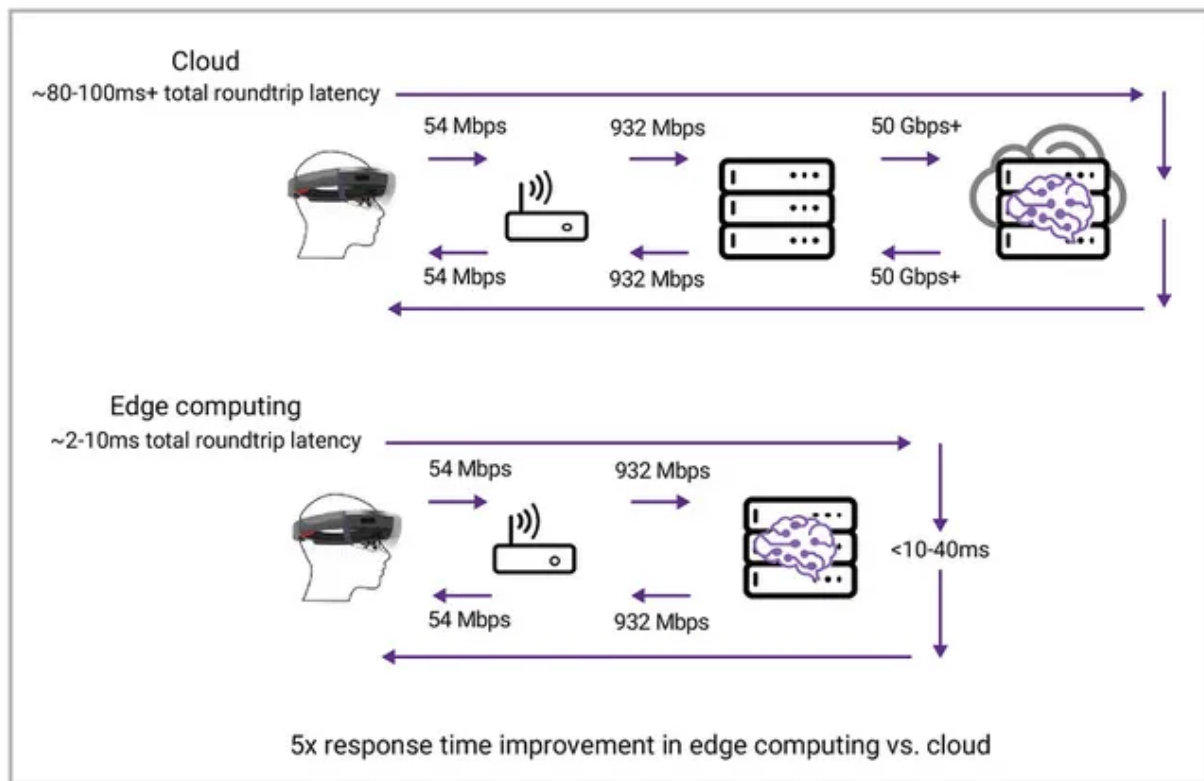
De bovenstaande figuur (1 hoofdstuk 6) omschrijft de huidige situatie. Er zijn een aantal devices die constant data versturen. Dit wordt verwerkt in een cloud omgeving of opgeslagen in een datacenter om verwerkt te worden. Volgens (Lowman, 2022) heeft dit systeem een aantal nadelen. De apparatuur op locatie is niet op processie niveau sterk genoeg om complexe algoritmes uit te voeren en daarop beslissingen te nemen. En de cloud en datacenter niveau ligt vaak op verre locaties met 100ms round-trip delay. Met hoge energiekosten worden constant berekeningen uitgevoerd. Edge computing is hiervoor de oplossingen. Om toch een situatie te creëren waarbij de on-site apparatuur een directe feedback geeft met genoeg processie kracht.

6.2. Latency Round-trip

Volgens (National Telecommunications and Information Administration, 2022) is round-trip delay (RTD) de tijd van het versturen van een datapacket plus de conformatie dat het signaal is ontvangen. RTD heeft verschillende benamingen en kan ook synoniem staan met round-trip time (RTT) of ping. In onze huidige situatie waar onze mobiele devices data signalen versturen vanaf een router naar server/datacenter en vervolgens doorgaat naar een cloud database. Verwacht men een gemiddelde RTD van 80-100ms. In figuur (2 van hoofdstuk 6) is te zien hoe deze data wordt verplaatst tussen de 3 partijen. De grootste boosdoeners in de huidige ketting zijn het aantal veranderingen in signalen, de

fysieke afstand tussen de verschillende punten in de ketting en de totale processing kracht zit vast in één locatie.

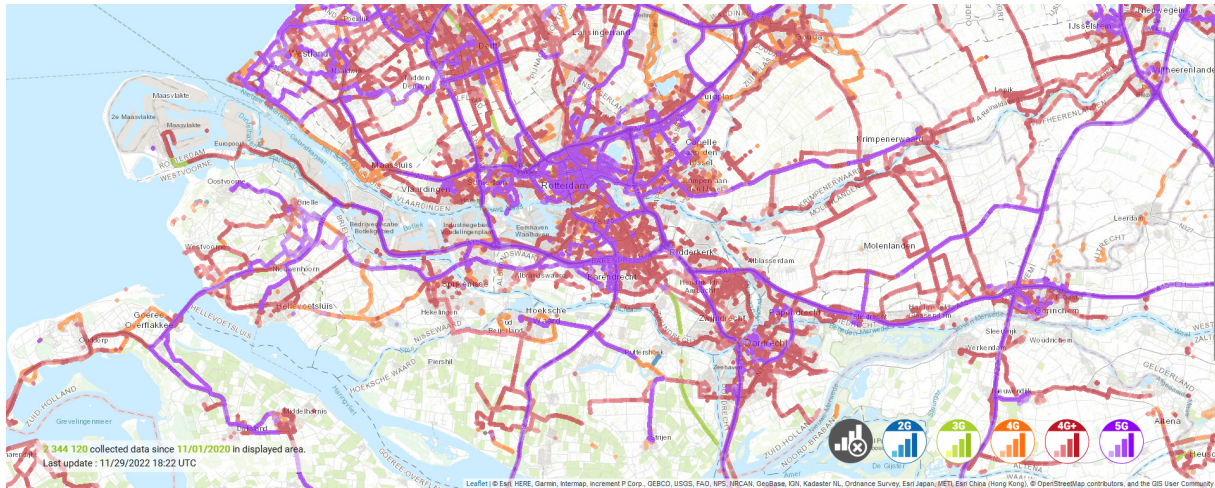
Edge computing doet de RTD op de volgende manier verkleinen. Het principe gaat er vanuit dat een groot deel van data niet opgeslagen hoeft te worden voordat het verwerkt wordt op Cloud niveau. Hierdoor kan de ontvangen data direct verwerkt worden. Als hiervoor geen ruimte is één node van het edge netwerk, kan het proces tijdelijk verplaatst worden naar een nabije node in het netwerk en daar verwerkt worden. Hierdoor kan de RTD verminderd worden naar onder 10ms in een optimale situatie.



<https://semiengineering.com/how-ai-in-edge-computing-drives-5g-and-the-iiot/> Figure 2: Comparing latency for edge device to cloud server vs edge device to edge cloud server.

6.3. 5G

Een 5G mast heeft een bepaalde capaciteit waarmee deze kan werken. Momenteel staan er 507 (Antenne, 2022) in de Rotterdamse gemeente. Wanneer naar de verschillende netwerk dekkingsschema's wordt gekeken, is te zien dat de volledige gemeente bedekt is in het bereik van deze 507 5G masten (Wikipedia, 2022). Volgens een voorspelling van Cisco in 2020 zal het aantal netwerkkapparatuur zoals smartphones, laptops, smartwatches, etc. Vergroten naar 29.3 miljard. Dat is pakweg 3.6 apparaten per persoon op aarde. Als in er wordt ingezoomd op west Europa beslaat dit nummer 9.4 apparaten per persoon. Voor gemeente Rotterdam zou dat inhouden dat in 2023 het aantal apparaten dat op het 5G netwerk, en andere netwerken, verbinding wil maken op 6.16 miljoen uitkomt.



<https://www.nperf.com/en/map/NL/2747891.Rotterdam/5701.T-Mobile/signal/> Figuur 3 netwerk kaart gemeente rotterdam

6.4. Kan 5G de taak van edge computing overnemen?

(StIPartners, 2022) geeft aan dat de tijd van low latency bereikt is en dat er nu een tijd is aangebroken om ultra low latency op te zoeken. Zij geven aan de low latency bereikbaar is met het huidige 5G netwerk en dat dit steeds haalbaarder wordt met verbetering in het netwerk over de komende jaren.

Wanneer men echter spreekt over ultra low latency, een RTD van onder 5ms, is er één onderdeel dat 5G simpelweg niet kan oplossen. Namelijk de afstand. Wanneer 5G en 4G met elkaar vergeleken zouden worden in termen van twee grote buizen, dan heeft 5G een tweemaal zo grote diameter. Het heeft dus twee keer de capaciteit van 4G om data sneller en in grotere hoeveelheden te verplaatsen. Hierdoor daalt de RTD van 100ms met 4G, naar 10-20ms met 5G. Echter blijft één onderdeel hetzelfde en dat is de lengte van de spreekwoordelijke buis. Deze is nooit kleiner geworden. Een 4G netwerk gecombineerd met een edge netwerk, kan voor een RTD zorgen van 30ms. Dit is vergelijkbaar met 5G. Alleen door de buis qua lengte te verkleinen kunnen nieuwe oplossingen zoals autonoom rijden en drone verkeer worden toegepast.

6.5. 5G en Rotterdam.

In deze subparagraaf zijn bevindingen uiteengezet vanuit een interview met Jim Walda. Hij is adviseur en projectleider in verschillende projecten rondom het gebruik, installatie en communicatie van 5G in de gemeente Rotterdam. Volgens Walda heeft de gemeente geen actieve rol in het uitrollen van deze netwerken. Zij kunnen niet aangeven wanneer een antenne geplaatst moet worden en wat voor antenne dit is. Echter hebben ze wel de mogelijkheid vergunningen voor antennes af te wijzen wanneer private partijen deze willen uitrollen. Verder zien ze nu een trend in de soorten antennes die geplaatst worden. Voorheen werden antennes geplaatst met de gedachten dat 98% van de gemeente gedekt moest worden. Nu dit percentage is behaald plaatsen telecombedrijven meer antennes met de intentie om bandbreedte te vergroten. Dit doet men door gebruik te maken van kleinere antennes. Om niet op deze trend achter te lopen is de gemeente in gesprek met Lightwell om 5G en andere infrastructuur zoals EV-opladers en sensoren te verwerken in het straatmeubilair. Dit idee zal volgens Walda nog tientallen jaren kunnen duren, maar dit is afhankelijk van de vraag en het aanbod. Eerder in het interview gaf Walda aan dat de verbetering van het 5G netwerk en uitbreidingen hiervan voor meer vraag zal zorgen. Hij vergeleek dit met het verbreden van een snelweg. Het uitbreiden van een snelweg zorgt ervoor dat er meer mensen zijn die daar gebruik van willen maken. Aangezien mensen de gedachten hebben dat er door de wegverbreding een betere doorstroom van het verkeer is en dat zij minder lang in de file moeten staan.

6.5.1 Rotterdam en edge datacenters.

Een edge datacenter netwerk heeft twee taken, het verminderen van RTD en het vergroten van bandwidth. Als Rotterdam een trend ziet in de soorten Antennes die geplaatst worden met de gedachten om bandwidth te vergroten, dan kunnen edge datacenters een alternatief/toevoeging zijn. Op het gebied van latency benoemde Walda maar twee use cases die direct impact zullen ondervinden van een edge netwerk, afstand operaties en high frequency trading en dus op kleinere schaal mogelijk te rechtvaardigen valt, maar op grotere schaal zal naar de consumentenmarkt gekeken moeten worden voor oplossingen.

6.6 Edge Computing en zijn use cases

Edge computing is een technologie vergelijkbaar met 5G die de infrastructuur geeft om nieuwe innovaties te laten ontstaan. Dit zorgt ervoor dat om in te schatten of een nieuwe infrastructuur zijn waarden gaat terug verdienen zonder deze op de open markt te plaatsen. In dit hoofdstuk wordt gekeken naar producten die al mogelijk worden gemaakt met de huidige infrastructuur, maar verbeterd of bruikbaar worden gemaakt door middel van edge computing.

6.6.1 Technologie

In de technologie space is het idee van een digital twin (IBM, 2022) een virtueel model vergelijkbaar met een simulatie. Het verschil tussen een digital twin en een simulatie is schaal en tijd. Een standaard simulatie is vaak gespecificeerd op één proces binnen een stad. Een digital twin is meerdere van deze simulaties aangevuld met realtime data. Edge computing kan in samenhang met sensoren en andere IOT oplossingen om vervolgens op locatie en in realtime verschillende simulaties uitvoeren en vervolgens de meest voordelige simulatie in gang brengen (Gilly, Alcaraz, Akinin, Filiposka, & Mishev, 2020). De verschillende simulaties kunnen vervolgens later worden gebruikt om nieuwe vergunningen te verlenen en nieuwe ideeën en oplossingen toe te passen op data gedreven bewijs.

6.6.2 Automotive.

De automotive / mobiliteit industry is al jaren bezig met het digitaliseren van hun producten. De eerste Tesla autopilot was geïntroduceerd in 2015. In de 7 jaar sindsdien is het concept van vehicle-to-everything (V2X) ontstaan. Momenteel gebruiken auto's duizend sensoren, miljoenen lijnen code om verschillende elementen van een auto te besturen. Edge computing kan auto's comfortabeler en veiliger maken. (StlPartners 2, 2022)

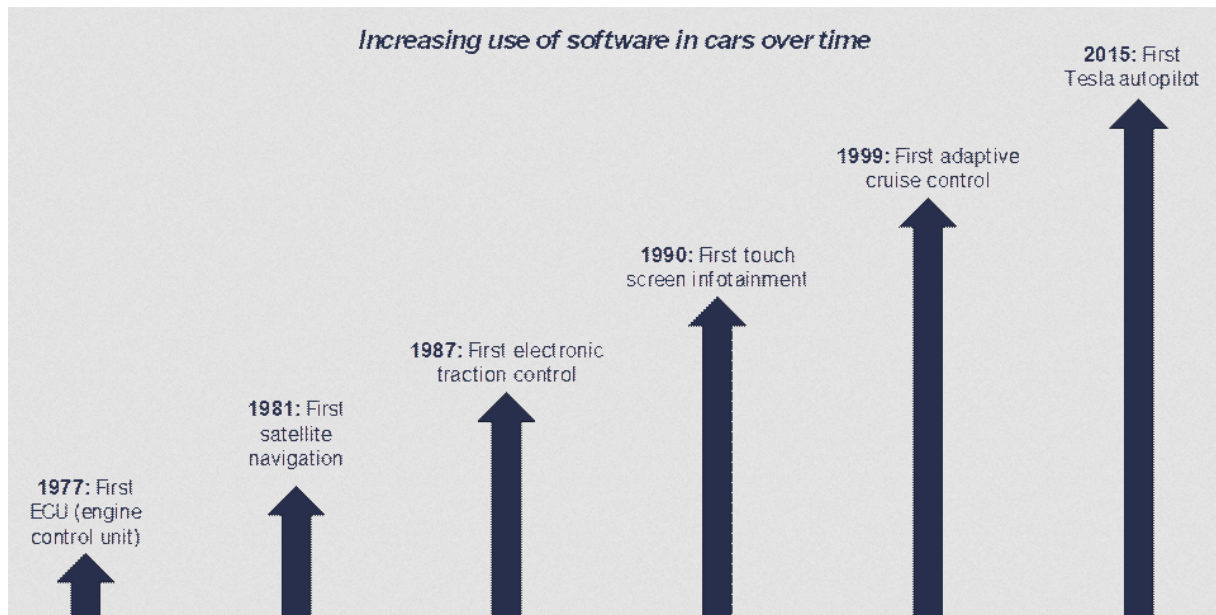


Figure 1: Software within cars is rapidly becoming more sophisticated, unlocking new use cases

Bedrijven zoals Mobileye en DriveBuddyAI zijn voorlopers in de V2X movement. Door auto's aan te sluiten via edge datacenters op de IOT van een stad kan een auto sneller en vanuit meerdere invalshoeken reageren op verschillende situaties (StIPartners 2, 2022).

Een andere verandering die plaatsvindt in deze sector is de opkomst van autonome drones. (Joel Dick, 2017) In het onderzoek van Joel Dick kregen camera gedreven drones, met behulp van 5G en edge computing, de mogelijkheid om een golfbal te volgen op topsnelheid bij het afslaan van een tee. Verder in (Junjue, et al., 2018) werd gekeken hoe swarm drones konden worden gebruikt in noodgevallen zoals zoektochten naar vermisten personen maar ook in wildlife onderzoeken. Binnen dit onderzoek gebruikten ze 4G als basis. Men kwam toch tot een conclusie dat edge computing een schaalbare oplossing is voor massa drone video analyse. Dat daarbij de grootste problemen die opgelost moesten worden bandwidth betreft zonder latency te verminderen.

6.6.3 Gezondheidszorg.

Vergelijkbaar met de digital twin van een stad is het mogelijk om een digital twin van een inwoner op te zetten. Door realtime informatie van de patiënt/inwoner te verzamelen kan er sneller ingegrepen worden bij ongelukken. Ze kunnen zelfs voorkomen worden. Een interessanter onderwerp is afstand chirurgische ingrepen. In (Tiwari, Kumar, & Tiwari, 2020) worden meerdere voorbeelden getoond van tele-surgeries en zij kwamen tot de conclusie dat met behulp van 5G en toegewijde computing systemen afstand operaties mogelijk maakt. Een mobile edge kan ervoor zorgen dat chirurgische ingrepen op locatie van het ongeluk gedaan kunnen worden.

6.6.4 Industrie.

(Tie Qiu, 2020) Beschrijft de vooruitgang en uitdagingen op het gebied van IOT en edge computing op het gebied van industrie en makers. Een groot voordeel dat zij voorstellen is het gebruik van edge technologie om het energiegebruik van een industrieterrein te verbeteren. Een smart grid maakt gebruik van sensoren om data realtime te verzamelen over het energieverbruik. Deze data is realtime heterogene data in grote volumes. Om deze data tijdig te kunnen gebruiken kunnen edge centers worden geïnstalleerd. Verder wordt de mogelijkheid van smart logistics hiermee ook mogelijk. Het automatiseren van industrieterreinen waarbij goederen automatische vervoert kunnen worden tussen de verschillende stoppen en op basis van realtime data beslissingen kunnen maken wanneer

een nieuw proces gestart kan worden kan alleen gebeuren als een extensief netwerk van edge datacenters wordt geplaatst.

6.6.5 Lifestyle.

Cloud and augmented reality gaming zijn twee uitvinding geïntroduceerd in de laatste 7 jaar. Maar in tegenstelling tot video, films en series vereist deze vorm van entertainment een lage latency en hoge computerkracht. (Xu Zhang, 2018) In het onderzoek van Zhang wordt aangetoond hoe een CloudGame met én zonder edge support werkt. Hoewel in beide gevallen problemen werden ondervonden wanneer edge computing aanwezig was, waren de gevallen van buffering, playback en streaming, opstarttijd lager en in mindere regelmaat aanwezig. Dus hoeveel milliseconden (ms) is te veel voor een mens? (Jonathan Deber, 2015) In het onderzoek van Deber werd gekeken naar hoeveel ms er nodig was om voor de gebruiker waarneembaar te zijn. Hieruit kwam dat wanneer een gebruiker direct iets moet slepen op een scherm, dat het al te waarnemen was op 11ms. Met sommige testers was er zelfs vertraging waar te nemen vanaf 8.3ms. Over het algemeen blijkt een RTD van 20ms al genoeg te zijn voor de meeste taken.

6.7 Conclusie Technologie.

Vanuit een technologisch standpunt kan er geconcludeerd worden dat edge computing voordelen kan opleveren. Met het advies om edge computing uit te draaien in specifieke sectoren en locaties waar momenteel antennes worden geplaatst om alleen bandwidth te verbreden. In sectoren zoals healthcare en automotive waar bestaande producten al bestaan waarbij lage latency een eis zal worden in de toekomst kan kleinschalig getest worden met verschillende edge types. Dit geeft ook de mogelijkheid om de open markt ideeën te testen en innovaties te maken voordat een edge netwerk wordt uitgebreid naar de gemeente Rotterdam als geheel.

7. Economisch verdienmodel Edge data centres (private partijen).

In dit hoofdstuk wordt per thema beschreven of private marktpartijen in de toekomst zullen investeren in Edge datacenters. Een analyse van de technologische nut en noodzaak per thema. Er zal een omschrijving komen of bedrijven bereid zullen zijn aangaande hun investering in termen van kosten en opbrengsten.

7.1. kosten en opbrengsten edge data centre.

Het grote verdienmodel van een datacenter kan in principe vergeleken worden met dat van een hotel. Men kan een server (kamer) huren zolang als ze willen. En het datacenter biedt alles wat men nodig heeft. Namelijk netwerken, stroom en onderhoud. Datacenters zijn eigenlijk min of meer een hybride bedrijf dat bestaat uit vastgoed, technologie en dienstverlening. Het aanbod van datacenters wordt ook wel "infrastructure as a service" genoemd. In principe houdt dat in dat mensen cloud infrastructuur huren. Dit zodat zij niet zelf voor voldoende snelle verbinding, ruimte, stroom, en onderhoud van de datacentres hoeven te zorgen. Uit onderzoek van Cost to Support Compute Capacity Benchmark Study van Emerson Network Power blijkt: hoe groter het datacenter hoe goedkoper het is om een kilowatt aan IT-capaciteit af te nemen. De kosten variëren van 5.467 dollar voor datacenters met een oppervlakte van meer dan 50.000 vierkante voet tot 26.495 dollar voor datacenters van 500 tot 5.000 vierkante voet. Het zijn vooral de energiekosten die flink dalen wanneer een datacenter groter is, namelijk met een prijsverschil van 180% tussen de kleinste en grootste datacenters (Emersonnetworkpower, 2016). Het ligt dus in de lijn der verwachting dat Edge datacenters in verhouding niet minder kosten maken in vergelijking met normale datacenters. Er zijn al meerdere grote buitenlandse bedrijven winstgevend in de Edge datacenter industrie. Een van de succesvolste is Edgeconnex. Dit bedrijf focust zich puur alleen op de Edge. Zij hebben zelfs al een Edge datacenters in Nederland - namelijk in Amsterdam. Dit bedrijf heeft een omzet van ongeveer 100 miljoen per jaar en het aantal werknemers van het bedrijf is dit jaar gestegen met 37%. Ook de omzet en het aantal locaties blijft elk jaar weer groeien (Growjo, 2020). Het is dus zeker mogelijk om winstgevend te zijn in de Edge datacenter business. De verwachting is dan ook dat de gehele Edge datacenter markt ongeveer 40% gaat groeien van 2022 tot 2030 (GrandviewResearch, 2022). Bij een stijgende verhouding van de vraag ten opzichte van aanbod zal ook de prijs voor de dienst stijgen - en deze groei in vraag lijkt een zekerheid te zijn. Om te concluderen, de Edge datacenter industrie lijkt al winstgevend te zijn. De winstgevendheid zal tijgen naarmate dat de vraag toeneemt. Dit is een fenomeen al eerder waargenomen in de opkomst van de traditionele datacenters. Daarnaast lijken deze datacenters over het algemeen te worden onderhouden door gespecialiseerde bedrijven en komen zij met grote investeringen aangezien het neerzetten ervan erg veel kost. In principe lijkt het erop dat de gemeente Rotterdam het bedrijf voornamelijk dient te voorzien van de benodigde ruimte en eventueel startkapitaal.

8. Conclusie en aanbevelingen.

In de toekomst kunnen Edge datacentres een belangrijke rol spelen om “super low latency” te realiseren bij bepaalde toepassingen. 5G heeft al de mogelijkheid om super low latency te bieden. Echter is er alleen een beperking in afstand wat betreft verzenden van data. Dit kan alleen verkleint worden middels edge data centres. In andere woorden wordt het gebruik van een edge datacentre in de meeste gevallen alleen gebruikt voor het uitbreiden van de bandbreedte van 5G. Hetgeen dat nodig is wanneer er meerdere gebruikers data ophalen en verzenden en wanneer de databestanden een zwaar gewicht kennen. In de tegenwoordige tijd kan de technologie van 5G en glasvezel volstaan om een lage latency en voldoende bandbreedte te garanderen. Voor de meeste sectoren en toepassingen is dit voldoende. Naar verwachting is een edge datacentre voor de thema's gezondheidszorg, industrie en automotive een belangrijke toevoeging om nieuwe technologieën te kunnen gebruiken. Bij de andere thema's zijn er ook nieuwe technologieën, echter minder urgent. Naar verwachting heeft de industrie en gezondheidszorg financieel gezien de meeste mogelijkheden om een dergelijke investering te plaatsen. Voor de mensen thuis (lifestyle) en de automotive industrie zijn het dure investeringen die men voorlopig niet van plan is te realiseren. Zo zal het voor lifestyle pas rendabel zijn als mensen bereid zijn om hun bandbreedte uit te breiden en latency te verlagen. Deze urgentie gaat men pas voelen wanneer toepassingen binnenshuis niet kunnen functioneren zonder. Aangezien glasvezel een voldoende snelheid kan garanderen, zal dit nog lang duren voordat dit er komt. Een andere mogelijke drang om toch een edge datacentre in huis te nemen betreft: de behoefte aan augmented reality. Aangezien de investering in een edge datacentre op heden vrij prijzig is, zal het nog een tijd duren voordat consumenten dit thuis aanschaffen. Andere behoeftige sectoren kunnen door hun vraag naar edge datacentres de prijs ervan begunstigen. Meer aanbod van een product leidt meestal tot een prijsdaling. Voor de automotive industrie is het een feit dat het verdienmodel het niet toelaat om toepassingen in de auto's te verwerken waardoor zij kunnen communiceren met edge datacentres. Zolang de prijs van de technologie te duur is en het niet rendabel is dit in diens producten te implementeren, is er vanuit deze sector geen vraag. Naar verluidt gaat het nog lang duren voordat de automotive industrie klaar is om gebruik te maken van edge datacentres, zodoende autonoom te rijden. (Aujla et al. 2019). De industrie zal als eerste de nijging hebben een edgedata centre aan te schaffen. Het zijn immers vaak private partijen die het geld er voor over hebben en dit makkelijk kunnen bekostigen. Voor hen is het van toegevoegde meerwaarde om hun productieproces te verbeteren. Hiermee kunnen kosten worden bespaard. Voor de gezondheidszorg zal het van toepassing zijn om nieuwe technieken toe te passen. Echter is het een sector die over een beperkte financiële middelen beschikt. Ook in deze sector zal het lang duren voor men gebruik wil maken van edge data centres. Er zijn geen use cases betreffende edge data centres. Use cases zijn een beschrijving van een technologisch systeem “wie” met “wat” iets kan doen. Dit geeft ook aan dat er op het moment weinig vraag en behoefte is naar edge datacentres.

Voor de gemeente Rotterdam is het volgende aan te bevelen.

- Houdt voor het komende decennium geen rekening met de komst van edge datacentres binnen de thema's: gezondheidszorg, automotive en lifestyle.
- Edge datacentres zullen als eerste gebruikt worden om 5G te verbeteren. De zogenoemde mobile edge. Bezie als gemeente of providers hier vergunning technisch de mogelijkheid toe hebben. Zijn er wellicht bottlenecks waar de gemeente bij kan helpen?
- Blijf het aantal 5G masten uitbreiden. Blijf vergunningen verlenen voor de 5G masten om de bandwith (bandbreedte) optimaal te houden. Ervoor te zorgen dat mensen toegang hebben tot snel mobiel internet.
- Houdt de markt in de gaten aangaande nieuwe technologische ontwikkelingen binnen de genoemde sectoren. Bezie of Rotterdam via een “hub” bottlenecks kan wegnemen om innovaties te versnellen.

- Bezie of er met partijen use cases ontwikkeld kunnen worden in sectoren waar super low latency een toegevoegde waarde heeft. In dit geval de gezondheidszorg met opereren op afstand of binnen de haven van Rotterdam met autonoom rijdende voertuigen.
- Zorg dat de stad van een goed glasvezel netwerk is voorzien door tijdig vergunningen hiervoor te verlenen aan telecomproviders.
- Sta in contact met landelijk. Bezie wat het ministerie van infrastructuur en waterstaat doet op dit thema, aangaande edge datacentres voor autonoom rijden. Zij houden zich bezig met het opstellen van methodologische ontwerpkeuzes aangaande nieuwe wegen. Waarbij men ruimte bied voor de implementatie van nieuwe technologieën.

9. Bronnen.

Antennebureau. (2022, November 30). *Locaties antennes in Nederland*. Geraadpleegd op 21 december 2022, van, <https://www.antennebureau.nl/plaatsing-antennes/locaties-antennes-in-nederland>

Aujla, G. S. S., Kumar, N., Garg, S., Kaur, K., & Ranjan, R. (2019). EDCSuS: Sustainable edge data centers as a service in SDN-enabled vehicular environment. *IEEE Transactions on Sustainable Computing*. Geraadpleegd op 17 november 2022, van <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8673655>

Bakker, B., Diran, D., Lazo, C., & Geurts, A. (2021) Het technologisch ecosysteem van AI in Nederland. Geraadpleegd op 17 november 2022, van https://privacy-web.nl/wp-content/uploads/po_assets/595040.pdf

Bilal, K., Khalid, O., Erbad, A., & Khan, S. U. (2018). Potentials, trends, and prospects in edge technologies: Fog, cloudlet, mobile edge, and micro data centers. *Computer Networks*, 130, 94-120. Geraadpleegd op 17 november 2022, van https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1389128617303778?casa_token=r8nRyl8GkWsAAAAA:0lCgcoy-pPZ3_tdGglUKtHf4T5k67a-F3Dteof1trQ0n7wNh0Wnol8zTh_Ngh8Pj5lKu2RVTFA

China expands its global dominance in 5G networks, now with the 700 MHz band. (2021, 25 augustus). on5g. Geraadpleegd op 4 december 2022, van <https://on5g.es/en/china-expands-its-global-dominance-in-5g-networks-now-with-the-700-mhz-band/>

Cisco Systems, Inc. (2022, November 30). *Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper*. Geraadpleegd op 21 december 2022, van, <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>

De moderne datacenter is de edge-datacenter. (2022, 6 mei). Computable. Geraadpleegd op 8 december 2022, van <https://www.computable.nl/artikel/opinie/datacenters/7351096/1509029/de-moderne-datacenter-is-de-edge-datacenter.html>

Diez-Olivan, A., Del Ser, J., Galar, D., & Sierra, B. (2019). Data fusion and machine learning for industrial prognosis: Trends and perspectives towards Industry 4.0. *Information Fusion*, 50, 92-111. Geraadpleegd op 17 november 2022, van https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1566253518304706?casa_token=nhzXxkZY9WwAAAAA:QE5EJoROYi_j1yfqT9Kp3gmAVAIVpZltoJ3qABgi9liNrW2BNgOrLabf9fEe9z8FT-y8r4Asag

Edge Computing Market Size, Share & Growth Report, 2030. (z.d.). Grandviewresearch. Geraadpleegd op 12 december 2022, van <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/edge-computing-market>

Edge Computing, Insights, IoT, Sync. (2022, 30 september). *Why do we need Edge Computing for a sustainable future?* ObjectBox. Geraadpleegd op 6 december 2022, van <https://objectbox.io/why-do-we-need-edge-computing-for-a-sustainable-future/>
EdgeConneX Revenue and Competitors. (2022). Growjo. Geraadpleegd op 12 december 2022, van <https://growjo.com/company/EdgeConneX>

Fitri, A. (2022, 26 juli). *What China's lead in edge computing means for the world*. Tech Monitor. Geraadpleegd op 12 december 2022,

van <https://techmonitor.ai/technology/networks/what-chinas-lead-in-edge-computing-means-for-the-world>

Gillis, A. S. (2020, 27 oktober). *edge data center*. SearchDataCenter.
<https://www.techtarget.com/searchdatacenter/definition/edge-data-center>

Gilly, K., Alcaraz, S., Akin, N., Filiposka, S., & Mishev, A. (2020). Modelling Edge Computing in Urban Mobility Simulation Scenarios. *ResearchGate*, 539-543.

IBM. (2022, December 19). *How does a digital twin work?*. Geraadpleegd op 21 december 2022. van, <https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin>
Is een datacenter vergunningplichtig? (z.d.). Kenniscentrum InfoMil. Geraadpleegd op 8 december 2022,
van <https://www.infomil.nl/onderwerpen/integrale/activiteitenbesluit/toelichting-bor/vergunningplicht/dienstverlening/bijlage-bor/datacenter-vergunningplichtig/>

Joel Dick, C. P. (2017). *Poster Abstract: High Speed Object Tracking Using Edge*. Toronto: University of Toronto.

Jonathan Deber, R. J. (2015). How Much Faster is Fast Enough? User Perception of Latency & Latency Improvements in Direct and Indirect Touch. *CHI '15: Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1827–1836.

Junjue, W., Ziqiang, F., Zhuo, C., Shilpa, G., Mihir, B., Padmanabhan, P., . . . Mahadev, S. (2018). Bandwidth-efficient Live Video Analytics for Drones via Edge Computing. *2018 IEEE/ACM Symposium on Edge Computing*, 159-173.

Leemputten, P. van. (2021, 8 maart). *“België niet de aantrekkelijkste plaats voor datacenters” - klopt dat wel?* Site-DataNews-NL. Geraadpleegd op 8 december 2022,
van https://datanews.knack.be/ict/nieuws/belgie-niet-de-aantrekkelijkste-plaats-voor-datacenters-klopt-dat-wel/article-longread-1708425.html?cookie_check=1670327758

Lowman, R. (2022, November 30). *how-ai-in-edge-computing-drives-5g-and-the-iot*. Geraadpleegd op 21 december 2022. van, <https://semiengineering.com>:
<https://semiengineering.com/how-ai-in-edge-computing-drives-5g-and-the-iot/>

Madamombe, R. (2017, 20 juni). *What really do data centres sell?* Techzim. Geraadpleegd op 12 december 2022, van <https://www.techzim.co.zw/2017/06/different-services-offered-by-data-centers/>

National Telecommunications and Information Administration. (2022). *Round-trip delay*. Boulder, Colorado: National Telecommunications and Information Administration.

Profitable Venture Magazine Ltd. (2022b, september 7). *Types of Data Center Business Model (How They Make Money)*. ProfitableVenture. Geraadpleegd op 12 december 2022,
van <https://www.profitableventure.com/data-center-business-model/>

Qualcomm. (z.d.). *What is 5G?* 5G. Geraadpleegd op 4 december 2022,
van <https://www.qualcomm.com/5g/what-is-5g>

Qualcomm. (z.d.-a). *5G NR Overview*. 5Gnr. Geraadpleegd op 4 december 2022,
van <https://www.qualcomm.com/research/5g/5g-nr>

STL Partners. (2022, 18 februari). *Edge computing: Changing the balance of energy consumption in networks*. Geraadpleegd op 6 december 2022, van <https://stlpartners.com/articles/edge-computing/edge-computing-changing-the-balance-of-energy-in-networks/>

StlPartners 2. (2022, December 19). *Edge computing and 5g in the automotive industry: from gears to software*. Geraadpleegd op 21 december 2022. van, stlpartners.com: <https://stlpartners.com/articles/edge-computing/edge-computing-5g-in-the-automotive-industry/>

StlPartners. (2022, November 30). *edge-computing/5g-edge-computing*. Geraadpleegd op 21 december 2022. van, stlpartners.com: <https://stlpartners.com/articles/edge-computing/5g-edge-computing/>

Tie Qiu, J. C. (2020). *Edge Computing in Industrial Internet of Things: Architecture, Advances and Challenges*. IEEE.

Tiwari, K., Kumar, S., & Tiwari, R. (2020). FOG Assisted Healthcare Architecture for Pre-Operative Support to Reduce latency. *Procedia Computer Science Volume 167*, 1312-1324.

Wang, S., Gu, Z., & Ni, Q. (2020). Cognitive computing and wireless communications on the edge for healthcare service robots. *Computer Communications*, 149, 99-106. Geraadpleegd op 17 november 2022, van https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366419307960?casa_token=drj4AtHBkSEAAAAA:zabmrqznf8u2Zl87qoUL0mJvc4yFcjkmFac-Hkk2KY8ai_Em-k1haZy6gHm0KynFS1q9cdstjA

Wang, S., Zhao, Y., Xu, J., Yuan, J., & Hsu, C. H. (2019). Edge server placement in mobile edge computing. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 127, 160-168. Geraadpleegd op 21 november 2022, van https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0743731518304398?casa_token=1KqRLvRuuKcA AAAA:2bgqUyzhbl8enX-hRAEjFmIzlB5DZFFA1TVWAc08yL57GqjHCFaCSYx5klc1XDkx4QJa5tAAzg

What is a digital twin? | IBM. (z.d.). IBM. Geraadpleegd op 4 december 2022, van <https://www.ibm.com/topics/what-is-a-digital-twin>

What is a smart city? (z.d.). Enel X. Geraadpleegd op 4 december 2022, van <https://corporate.enelx.com/en/question-and-answers/what-is-a-smart-city>

What is an Edge Data Center? (z.d.). Sunbird DCIM. Geraadpleegd op 17 november 2022, van <https://www.sunbirdcim.com/edge-data-center>

What is IoT and how does it work? | SAP Insights. (z.d.). SAP. Geraadpleegd op 4 december 2022, van <https://www.sap.com/insights/what-is-iot-internet-of-things.html>

What is latency? How to fix latency. (z.d.). Cloudflare. Geraadpleegd op 4 december 2022, van <https://www.cloudflare.com/learning/performance/glossary/what-is-latency/>

What is Real-Time Data? An introduction. (2021, augustus). Splunk. Geraadpleegd op 4 december 2022, van https://www.splunk.com/en_us/data-insider/what-is-real-time-data.html
Wikipedia. (2022, November 30). *Edge_computing*. Geraadpleegd op 21 december 2022. van, <https://en.wikipedia.org/wiki/>

Xu Zhang, H. C. (2018). Improving Cloud Gaming Experience through Mobile Edge Computing. *IEEE Wireless Communications Volume 26*, 178-183.

Zhang, M. (2022, 3 oktober). *What is an Edge Data Center? (With Examples)*. Dgtl Infra.
<https://dgtlinfra.com/what-is-an-edge-data-center/>

Zhang, M. (2022, November 30). *What is an Edge Data Center? (With Examples)*. Geraadpleegd op 21 december 2022. van, <https://dgtlinfra.com/what-is-an-edge-data-center/>