

Diplomarbeit

Grundlagen ökologischer Dimensionierung von Straßen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieurin
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

Diploma Thesis

Basics of ecological dimensioning of roads

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieurin
of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

von

Sophia Rockenschaub, BSc

Matr.Nr.: 11704320

Betreuung: Assistant Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Lukas Eberhardsteiner, BSc**
Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich Straßenwesen
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/E230-03, 1040 Wien, Österreich

Wien, im November 2024

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den Grundlagen der ökologischen Dimensionierung von Straßen. Ziel dieser Arbeit ist es, anhand umfassender Literaturrecherche den Beitrag des Straßenbaus zur Umwelt- und Gesundheitsbelastung zu ermitteln und das Reduktionspotential verschiedener Bauweisen und -materialien aufzuzeigen. Demensprechend lautet die Forschungsfrage: Wie können Straßenbauprojekte dimensioniert werden, sodass nicht nur die infrastrukturellen Anforderungen erfüllt, sondern auch potenzielle Folgen für die menschliche Gesundheit und die Umwelt berücksichtigt werden?

Um diese Frage zu beantworten, werden unterschiedliche zentrale Aspekte, wie Lärmemissionen, urbane Hitzeinseln, Flächenversiegelung, Luftschadstoffe und Baustoffrecycling, betrachtet. Zu jedem Thema werden mehrere Bauweisen oder -materialien, wie dichte und offenporige Asphalt- bzw. Betondeckschichten, vorgestellt und ihre Auswirkungen verglichen. Im Kontext der Schall- und Wärmeentwicklung liegt ein besonderes Augenmerk auf offenporigen Deckschichten. Es zeigt sich, dass poröse Fahrbahndecken einen wichtigen Beitrag zur Lärm- und Hitzereduktion leisten können. Der Verbesserung des städtischen Mikroklimas und des akustischen Umfelds stehen jedoch eine geringe Dauerhaftigkeit und kurze Lebensdauer gegenüber. Dies reduziert nicht nur den ökologischen Vorteil, da der Ressourcen- und Energieverbrauch durch die regelmäßigen Instandhaltungsarbeiten verglichen mit der herkömmlichen Bauweise erheblich steigt, sondern führt auch zu erhöhten Kosten.

Die Arbeit thematisiert weiters die Flächenversiegelung durch Straßen. Auch hier werden offenporige Deckschichten behandelt. Darüber hinaus werden versickerungsfähige Pflasterdecken betrachtet, die sich für den Einsatz auf Flächen mit geringer Verkehrsbelastung eignen. Ihre Anwendung kann eine Annäherung an den natürlichen Wasserhaushalt bewirken, die Grundwasserneubildung fördern, das bestehende Kanalsystem entlasten und Überflutungen bei Starkregen vermeiden. Bei der Planung sind jedenfalls wasserrechtliche Vorgaben zu berücksichtigen. Die Recherche ergibt wieder, dass die geringe Dauerhaftigkeit poröser Straßenbeläge ein Problem darstellt.

Ein weiterer Schwerpunkt dieser Diplomarbeit liegt auf Luftschadstoffen, ihren Folgen für Mensch und Umwelt und inwiefern straßenbauliche Entscheidungen die Schadstoffemissionen beeinflussen. Betrachtet werden Feinstaub, flüchtige organische Verbindungen, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe und Kohlenstoffdioxid. Es zeigt sich, dass sowohl in der Materialproduktion als auch in der Straßenerrichtung sowie im -betrieb Verbesserungen möglich sind. Zum einen können die Reduktion des Zementanteils im Beton und Niedrigtemperaturasphalte einen wichtigen Beitrag leisten. Zum anderen spielen die Straßenerhaltung, die -reinigung und der Winterdienst eine entscheidende Rolle.

Darüber hinaus wird das Recycling von Straßenbaustoffen behandelt. Eine effiziente Wiederverwertung von Abfällen kann einen erheblichen Beitrag zur Ressourcenschonung leisten, wobei vor allem im Bereich des Aushubmaterials noch großes Potenzial liegt.

Die Arbeit zeigt, dass bereits eine Vielzahl von technischen Lösungen für die ökologischen Herausforderungen des Straßenbaus existiert. Ihre Anwendung ist jedoch aufgrund verschiedener Wechselwirkungen oft schwierig. Eine nachhaltige Planung muss daher immer ganzheitlich unter Betrachtung aller ökologischen, wirtschaftlichen und infrastrukturellen Randbedingungen passieren.

Abstract

This thesis deals with the basics of the ecological dimensioning of roads. The aim of this work is to determine the contribution of road construction to environmental and health pollution on the basis of comprehensive literature research and to demonstrate the reduction potential of different construction methods and materials. Accordingly, the research question is: How can road construction projects be dimensioned so that not only infrastructural requirements are met, but also potential consequences for human health and the environment are taken into account?

To answer this question, various key aspects such as noise emissions, urban heat islands, land sealing, air pollutants and building material recycling are considered. For each topic, several construction methods or materials, such as dense and porous asphalt or concrete surfaces, are presented and their effects compared. In the context of noise and heat generation, particular attention is paid to porous wearing courses. It is shown that porous road surfaces can make an important contribution to noise and heat reduction. However, the improvement of the urban microclimate and the acoustic environment is offset by low durability and a short service life. This not only reduces the ecological advantage, as the consumption of resources and energy increases considerably due to regular maintenance work, but also leads to increased maintenance costs.

The thesis also addresses the sealing of surfaces by roads. Open-pored surface courses are also dealt with here. In addition, infiltration-capable paving surfaces are considered, which are suitable for use on areas with low traffic loads. Their application can bring about an approximation to the natural water balance, promote groundwater recharge, relieve the existing sewer system and prevent flooding during heavy rainfall. In any case, water law requirements must be taken into account during planning. The research again shows that the low durability of porous road surfaces is a problem.

Another focus of this thesis is on air pollutants, their consequences for people and the environment and the extent to which road construction decisions influence pollutant emissions. Particulate matter, volatile organic compounds, polycyclic aromatic hydrocarbons and carbon dioxide are analysed. The results show that improvements are possible in material production as well as in road construction and operation. On the one hand, reducing the cement content in concrete and low-temperature asphalts can make an important contribution. On the other hand, road maintenance, especially in winter, and road cleaning play a decisive role.

The recycling of road construction materials is also being investigated. Efficient recycling of waste can make a significant contribution to conserving resources, whereby there is still great potential in the area of excavated material in particular.

The thesis shows that a large number of technical solutions for the ecological challenges of road construction already exist. However, their application is often difficult due to various interactions. Sustainable planning must therefore always take a holistic approach into account, considering all ecological, economic and infrastructural boundary conditions.

Inhalt

1	Einleitung.....	6
1.1	Hintergrund und Motivation.....	6
1.2	Ziel der Arbeit.....	6
1.3	Forschungsfrage.....	7
1.4	Methodik und Struktur der Arbeit	7
2	Grundlagen.....	8
2.1	Geschichte des Straßenbaus.....	8
2.2	Aktuelle Bedeutung der ökologischen Dimensionierung von Straßen	8
3	Lärmentwicklung.....	10
3.1	Akustische Grundlagen	10
3.2	Auswirkungen von Straßenlärm.....	10
3.3	Entstehung von Straßenlärm	11
3.4	Messung von Straßenlärm	12
3.5	Lärminderung durch Straßenoberflächen	13
3.5.1	Dichte Asphaltdeckschichten.....	13
3.5.2	Offenporige Asphaltdeckschichten	15
3.5.3	Dichte Betondeckschichten	16
3.5.4	Offenporige Betondeckschichten	17
3.5.5	Pflasterdecken	17
4	Wärmeentwicklung und Hitzeinseln	20
4.1	Hitzeinseln in urbanen Gebieten	20
4.2	Einflussfaktoren auf die Wärmeentwicklung.....	21
4.2.1	Reflexionsvermögen von Straßenbelägen.....	21
4.2.2	Porosität der Straßenoberfläche	23
4.2.3	Versickerungsfähige Pflaster	24
5	Flächenversiegelung.....	26
5.1	Dimensionierung der Oberflächenentwässerung.....	27
5.2	Durchlässigkeit von Straßen.....	28
5.3	Anwendung versickerungsfähiger Bauweisen	30
5.3.1	Wasserdurchlässige Asphaltdeckschichten	31
5.3.2	Wasserdurchlässige Betondeckschichten.....	32
5.3.3	Versickerungsfähige Pflasterdecken.....	33
5.3.4	Erfahrungen zur Dauerhaftigkeit versickerungsfähiger Verkehrsflächen	35

5.4	Schwammstadt-Prinzip	37
6	Luftschadstoffe.....	38
6.1	Luftschadstoffe und ihre Auswirkungen.....	38
6.1.1	Feinstaub	39
6.1.2	Flüchtige organische Verbindungen (VOC).....	43
6.1.3	Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK).....	45
6.1.4	Kohlenstoffdioxid (CO ₂)	46
7	Nutzung natürlicher Ressourcen	50
7.1	Recycling im Straßenbau – rechtlicher Rahmen	52
7.2	Asphaltrecycling.....	53
7.2.1	Verwertungsmethoden	55
7.3	Betonrecycling	56
7.4	Recycling von Aushubmaterial.....	58
8	Schlussfolgerungen.....	60
8.1	Zusammenfassung und Fazit.....	60
8.2	Ausblick	61

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Eine gute Verkehrsinfrastruktur ist wichtig für die Gesellschaft und die wirtschaftliche Entwicklung eines Landes. Dazu gehört auch ein effizientes Straßennetz, das den Transport von Personen und Gütern zwischen urbanen und peripheren Gebieten ermöglicht. Der Straßenbau weist bereits eine lange Geschichte auf. Erheblich an Bedeutung gewonnen hat er seit der industriellen Revolution. Der enorme Ausbau der Straßeninfrastruktur in den letzten Jahrhunderten brachte aber ungeahnte ökologische Folgen mit sich, da er den natürlichen Luft-, Wasser- und Temperaturhaushalt der Erde veränderte. Gesundheitsschädliche Luftverschmutzung und städtische Hitzeinseln sind nur einige der Herausforderungen, die mit der herkömmlichen Planung von Straßen einhergehen.

Umweltschutz ist ein Thema, das die Menschen seit den 1970er Jahren beschäftigt. Das Bewusstsein für die weltweiten ökologischen Probleme ist seither erheblich gestiegen und immer mehr wird deutlich, dass es in nahezu allen Bereichen – auch im Straßenbau – neue und nachhaltige Entwicklungen braucht, um die Belastungen für Mensch und Umwelt zu minimieren und eine lebenswerte Zukunft zu sichern. Das Konzept der ökologischen Dimensionierung von Straßen ist dabei ein wichtiger Baustein und soll eine Balance zwischen der gesellschaftlichen Notwendigkeit eines funktionierenden Straßennetzes und den daraus folgenden Umwelteinflüssen schaffen.

Besondere Herausforderungen ergeben sich dabei in urbanen Gebieten. Städte weisen eine hohe Verkehrs- und Versiegelungsdichte auf, weswegen dort die Umweltbelastung am stärksten spürbar ist. Sie sind aus diesem Grund auch oft Vorreiter bei den Anpassungsstrategien. Die Maßnahmen dienen zur Reduktion der Lärm- und Schadstoffemissionen, zur Minimierung des städtischen Hitzeinsel-Effekts und zur Entsiegelung von Flächen. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Reduktion des Ressourcenverbrauchs durch Recycling.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den Grundlagen der ökologischen Dimensionierung von Straßen, indem die Probleme der herkömmlichen Bauweise aufgezeigt und neue Entwicklungen vorgestellt werden. Ziel ist es, einen umfassenden Überblick über die globalen Herausforderungen zu geben und zu zeigen, welche Lösungen im Straßenbau implementiert werden können.

1.2 Ziel der Arbeit

Ziel dieser Diplomarbeit ist eine strategische Untersuchung der Grundlagen der ökologischen Dimensionierung von Straßen. Neben den theoretischen Zusammenhängen sollen auch praxisnahe Lösungen im Fokus stehen. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf den Themen Lärmschutz, städtische Hitzeinseln, Flächenversiegelung, Luftschadstoffe und Schonung natürlicher Ressourcen. Um eine Brücke zwischen Theorie und Praxis zu schlagen, wird auch auf die aktuellen technischen und rechtlichen Rahmenbedingungen in Österreich eingegangen.

Es sollen mögliche, zu berücksichtigende Aspekte und Lösungsansätze aufgezeigt und der aktuelle Stand der Forschung dokumentiert werden. Ziel dieser Arbeit ist es jedoch nicht, konkrete Handlungsempfehlungen für zukünftige Bauprojekte zu geben, da alle Planungsentscheidungen stets unter Berücksichtigung der örtlichen Randbedingungen getroffen werden sollen. Dennoch soll diese Arbeit die Leser*innen zu nachhaltigeren Entscheidungen inspirieren und so einen Beitrag zur ökologischen Weiterentwicklung des Straßenbaus leisten.

1.3 Forschungsfrage

Im Zentrum dieser Diplomarbeit steht die Frage: Wie können Straßenbauprojekte dimensioniert werden, sodass nicht nur die infrastrukturellen Anforderungen erfüllt, sondern auch potenzielle Folgen für die menschliche Gesundheit und die Umwelt berücksichtigt werden?

Um diese Frage zu beantworten, werden in den folgenden Kapiteln verschiedene Aspekte des Umwelt- und Gesundheitsschutzes behandelt und die Auswirkungen, die der Straßenbau und -verkehr auf diese hat, analysiert. Darüber hinaus werden die technischen und rechtlichen Rahmenbedingungen aufgezeigt und mögliche Lösungsansätze vorgestellt.

1.4 Methodik und Struktur der Arbeit

Die vorliegende Diplomarbeit gliedert sich in mehrere Kapitel, die verschiedene Aspekte der ökologischen Dimensionierung von Straßen thematisieren. In Kapitel 2 werden die Grundlagen des Straßenbaus, wie die historische Entwicklung und die aktuelle ökologische Bedeutung, dargestellt.

In Kapitel 3 wird näher auf den Straßenverkehrslärm eingegangen. Neben den akustischen Grundlagen werden die Folgen für die menschliche Gesundheit erläutert. Es folgt eine Vorstellung verschiedener Bauweisen, die durch ihre Fahrbahnoberfläche zur Lärmreduktion beitragen können, beispielsweise offenporige Deckschichten aus Asphalt und Beton.

Kapitel 4 widmet sich der Wärmeentwicklung von Straßen und dem Effekt der städtischen Hitzeinseln. Ein besonderer Fokus wird hier auf die physikalischen Oberflächeneigenschaften der Straßenbeläge, wie dem Reflexionsvermögen und der Porosität, gelegt. Auch der Einfluss versickerungsfähiger Pflasterdecken wird erläutert.

In Kapitel 5 wird mit der Flächenversiegelung ein zentrales Umweltproblem des Straßenbaus thematisiert. Neben den Grundlagen, wie der Dimensionierung von Entwässerungsanlagen und der Durchlässigkeit verschiedener Straßenbeläge, werden versickerungsfähige Bauweisen aus verschiedenen Materialien vorgestellt. Des Weiteren wird kurz auf das Schwammstadt-Prinzip eingegangen.

Kapitel 6 beschäftigt sich mit verschiedenen Luftschadstoffen, die im Zuge des Baus oder Betriebs einer Straße entstehen. Die gesundheitlichen und ökologischen Folgen der wichtigsten Schadstoffe, wie Feinstaub und Kohlenstoffdioxid, werden aufgezeigt und der Einfluss unterschiedlicher Baustoffe erläutert.

Kapitel 7 befasst sich mit der Nutzung natürlicher Ressourcen und den Möglichkeiten des Recyclings im Straßenbau, indem die rechtlichen Rahmenbedingungen und technologischen Entwicklungen aufgezeigt werden.

Abschließend wird in Kapitel 8 ein Fazit gezogen und ein Ausblick auf zukünftige Herausforderungen und Entwicklungen gegeben.

Diese Arbeit basiert auf einer Literaturrecherche, in deren Zuge bestehende technische Vorschriften, Ergebnisse wissenschaftlicher Studien und Erkenntnisse aus umgesetzten Beispielen kombiniert werden. Für jeden Aspekt werden mehrere Lösungen aufgezeigt, um den Leser*innen ein breites Spektrum aufzuzeigen und so Möglichkeiten für diverse Randbedingungen späterer Projekte zu bieten.

2 Grundlagen

2.1 Geschichte des Straßenbaus

Bereits die Römer schufen systematisch ein Straßennetz, das sich über ganz Europa erstreckte. Die „viae publicae“ umfassten eine Gesamtlänge von bis zu 100.000 km und reichten von England bis zum östlichen Syrien. Sie dienten militärischen Zwecken, der raschen Nachrichtenverbreitung und dem Handel. Um die vollkommen geradlinigen Straßenabschnitte durchs Gelände ziehen zu können, wurden Brücken und Tunnel geschaffen und große Landmengen abgetragen oder aufgeschüttet. Auf beiden Seiten der Straße wurden stets Gräben gezogen, die der Kennzeichnung des Staatseigentums galten. Die Straße selbst umfasste eine Breite von 5 m bis 7 m und bestand aus mehreren Lagen. [1] Zur Errichtung wurde zunächst circa 1 m des Untergrundes ausgehoben und danach ein mehrschichtiges steinernes Bettungssystem errichtet. Darauf folgte eine Deckschicht, meist aus Pflastersteinen oder Kies. Um den Regenwasserabfluss zu garantieren, wurde auf eine leichte Wölbung der resultierenden Oberfläche geachtet. [2] Mit dem Untergang des römischen Reiches und dem Beginn des Mittelalters im fünften Jahrhundert nach Christus verfiel die römische Infrastruktur immer mehr. Bestehende Straßen wurden nicht ausreichend gewartet und das Wissen über die Baukunst ging mehr und mehr verloren. Da überregionaler Handel in den Hintergrund gerückt war, fand der Warentransport meist auf unbefestigten Wegen statt. Erst Mitte des 18. Jahrhunderts gewann der Straßenbau wieder an Bedeutung, da sich die politische Lage in Europa stabilisierte. Holz war damals günstig und einfach zu beschaffen, weshalb es zunächst häufig als Wegbaumaterial eingesetzt wurde. Mehr und mehr setzte sich aber die dreischichtige Bauweise mit Steinen als Packlage, gefolgt von einer Schotterschicht und einer Deckschicht aus Kies durch. Die Gründung der französischen nationalen Schule für Brücken und Straßen („École Nationale des Ponts et Chaussées“) setzte im Jahre 1760 einen Meilenstein in der Evolution des systematischen Straßenbaus in Europa. Durch das Aufkommen des Eisenbahnverkehrs rückte der überregionale Straßenbau Mitte des 19. Jahrhunderts wieder in den Vordergrund. Dies änderte sich erst mit der Verbreitung des Autos in den 1920er-Jahren. In der Zwischenzeit wurden in den USA die ersten Straßenbaumaschinen zur Errichtung von Asphaltstraßen patentiert. Diese neue Bauart vermied Staubaufwirbelungen, die bei Schotterstraßen durch das steigende Verkehrsaufkommen und die immer höhere Geschwindigkeit zum Problem wurden. Als Bindemittel wurde anfangs Teer verwendet, welches aufgrund seiner Toxizität mittlerweile durch Bitumen ersetzt wurde. [3] Die ersten Betonstraßen wurden in Österreich in den 1950er-Jahren errichtet und basierten auf der Bauweise der Reichsautobahnen. Um den lärmtechnischen Nachteil von Beton- gegenüber Asphaltdecken auszugleichen, wurde um 1990 die Waschbetondecke entwickelt, die bis heute die Standardbauweise für österreichische Autobahnen darstellt. [4]

Laut Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie [5] umfasste die Länge des österreichischen BundeStraßennetzes, bestehend aus Autobahnen und Schnellstraßen, im Jahre 1960 139 km, im Jahr 1970 bereits 439 km und stieg bis zum Jahr 2022 auf 2.249 km an, wobei sich weitere 217 km in Planung oder Bau befanden. Die Gesamtlänge des österreichischen Straßennetzes, mit Bundes-, Landes- und Gemeindestraßen, betrug im Jahr 2022 128.305 km.

2.2 Aktuelle Bedeutung der ökologischen Dimensionierung von Straßen

Verkehrsflächen bedecken mit einer Fläche von 2.079 km² 6,38 % des österreichischen Dauer-siedlungsraums. In Städten ist dieser Anteil noch deutlich höher und liegt für Wien bei 19,34 %. [5]

Dabei beeinflussen sie verschiedenste Umweltfaktoren, wie den Wasser- und Lufthaushalt sowie den Boden, was wiederum zu Veränderungen des Klimas, der Strahlung, der Luftqualität sowie des Grundwassers führt. Mit dem Bau einer Straße ändert sich die Bodenbedeckung und die entstehende versiegelte Fläche behindert die natürliche Versickerung und Retention von Niederschlag im Untergrund. Der Boden kann seine Funktion als Schadstofffilter und -senke nicht mehr erfüllen und der Grundwasserhaushalt wird verändert. Der Straßenkörper weist außerdem ein vollkommen anderes Wärmeverhalten als der ursprüngliche Zustand auf und es kommt zur sommerlichen Überwärmung durch die große Speicherung und langsame Abgabe von Hitze. Wird die Straße schließlich in Betrieb genommen, verursacht der Straßenverkehr zudem Lärm- und Schadstoffemissionen. [6]

Globale Herausforderungen wie der Klimawandel offenbaren, dass Veränderungen unabdingbar sind. Da eine zuverlässige Verkehrsinfrastruktur essenziell für Gesellschaft und Wirtschaft ist, gilt es, diese unter Erhalt der Leistungsfähigkeit an die neuen ökologischen Rahmenbedingungen anzupassen. [7] Welche Aspekte dies umfassen könnte und welche technologischen Möglichkeiten dafür zur Verfügung stehen, wird in den folgenden Kapiteln erläutert.

3 Lärmentwicklung

Der Mensch hat fünf Sinne – sehen, hören, riechen, schmecken und fühlen. Unzählige Reize treffen jede Sekunde auf uns ein und müssen vom Gehirn verarbeitet werden. Sind es zu viele, kann das zur Reizüberflutung führen. Lärm ist dabei eine Sinneseinwirkung, der wir uns nur schwer entziehen können. Welchen Beitrag der Verkehr und die Straße zu unserem akustischen Umfeld leisten und wie sich dieser durch straßenbauliche Änderungen beeinflussen lässt, wird in diesem Kapitel erläutert.

3.1 Akustische Grundlagen

Lärm ist unerwünschter, störender Schall und damit ein subjektives Empfinden. Schall, also Luftdruckschwankungen, die vom menschlichen Ohr wahrgenommen werden können, wird je nach Frequenz unterschiedlich bewertet – höhere Töne wirken bei gleichem Schallpegel lauter und störender als tiefere. Aus diesem Grund wird bei Messergebnissen häufig der A-bewertete Schalldruckpegel (dB(A)) angegeben, der sich nach Anwendung einer Korrekturkurve ergibt. Diese „Kurve gleicher Lautstärke“ ermöglicht repräsentative Aussagen zur empfundenen Lautstärke für alle Frequenzbereiche. [8]

Der für Menschen hörbare Bereich reicht von der Hörschwelle bei 0 dB(A) bis zur Schmerzschwelle bei etwa 120 dB(A). [9] Dezibel ist dabei eine logarithmische Einheit. Eine Verminderung um 10 dB(A) entspricht daher einer Halbierung der Lautstärke, eine Senkung um 3 dB(A) einer Halbierung der Schallintensität. Wird der Straßenlärm durch lärm mindernde Maßnahmen beispielsweise um 3 dB(A) reduziert, ist dies mit einer Halbierung des auftretenden Verkehrs vergleichbar. [8]

3.2 Auswirkungen von Straßenlärm

Als störender Schall hängt Lärm nicht nur von der tatsächlichen Lautstärke ab. Auch andere Faktoren können eine wichtige Rolle spielen. Dazu gehören die persönliche Einstellung und Geräuschsensibilität des Empfängers, dessen Tätigkeit sowie das Spektrum und die Charakteristik des Lärms. [10]

Lärm kann die menschliche Gesundheit erwiesenermaßen gravierend beeinträchtigen, was sich in körperlichen und psychischen Symptomen äußern kann. Neben auralen Auswirkungen, wie temporäre und permanente Hörschädigungen, treten auch extraaurale Wirkungen beim Menschen auf. Dazu zählen Muskelverspannungen, Schlafstörungen und Herz-Kreislauf-Erkrankungen. [11] Auch eine erhöhte Anzahl von Fehl- und Frühgeburten zählt zu den möglichen Folgen. [12] Lärm beeinträchtigt außerdem die Kommunikation, die Konzentrationsfähigkeit und die Erholung, wodurch es zu Leistungsabfall kommen kann. [8] Weiters wird ein Zusammenhang zwischen Lärm und Depressionen vermutet – steigt der Dauerschallpegels des Straßenlärms um 10 dB, erhöht sich das Depressionsrisiko Studien zufolge um 3 % bis 4 %. [13] Straßenlärm hat auch ökonomische Folgen – Untersuchungen bestätigen einen Zusammenhang zwischen der Lärmbelastung und dem Miet- bzw. Kaufpreis einer Immobilie. [9]

Betrachtet man Deutschland, so sind mit 22,1 % mehr als ein Fünftel der Bevölkerung am Tag und 15,2 % der Deutschen in der Nacht Verkehrslärm ausgesetzt, wobei Straßenlärm meist die Ursache ist. Für die Berechnung wurden Grenzwerte von 55 dB(A) tagsüber und 50 dB(A) nachts herangezogen, die über den Empfehlungen der WHO liegen. [14] Bei einer repräsentativen Befragung des Umweltbundesamtes gaben 2020 sogar 76 % der Deutschen an, sich durch Straßenlärm „zumindest etwas belästigt“ zu fühlen. [15]

3.3 Entstehung von Straßenlärm

Die Schallemissionen des Straßenverkehrs setzen sich aus verschiedenen Anteilen zusammen. Fahrzeugseitig resultiert aus der Fahrt ein Antriebsgeräusch, das vom Motor und Nebenaggregaten, wie dem Auspuff, stammt. Bei sehr hoher Fahrgeschwindigkeit muss des Weiteren ein Beitrag aus der aerodynamischen Umströmung des Fahrzeugs addiert werden. Jedoch sind bei Geschwindigkeiten ab 35 km/h bis 50 km/h die Rollgeräusche, die sich aus dem Reifen-Fahrbahn-Kontakt ergeben, dominant. [11] Letztere werden stark durch die Straßenoberfläche beeinflusst, weswegen sich dieses Kapitel vorrangig mit diesen beschäftigt. Die Eigenschaften der Deckschicht verändern sowohl die Schallanregung und -abstrahlung als auch die Schallausbreitung. [16]

Die Schallanregung teilt sich in zwei verschiedene Mechanismen. Einerseits kommt es zu einer mechanischen Schwingungsanregung des Reifens, andererseits zu aerodynamischen Anregungen in der Reifen-Fahrbahn-Kontaktfläche. [16]

Beim Rollen verändert sich die dynamische Steifigkeit des Reifens lokal durch die auftretende Verformung der Lauffläche und das Eindringen von Unebenheiten in das Reifenprofil, woraus eine Anregung des Rades resultiert. Auch die einzelnen Profilklotze werden beim Kontakt mit der Fahrbahn verformt und vibrieren daraufhin. Diese Schwingungen erzeugen Schallwellen, weshalb ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen der Rauigkeit der Oberfläche und der Schalldruckverteilung festgestellt werden kann. [16]

Die aerodynamische Anregung wird durch den sogenannten Air-Pumping-Effekt beschrieben, der in Abbildung 3.1 schematisch dargestellt ist. Luft ist im Gegensatz zu Wasser kompressibel und wird beim Rollen des Reifens in den abgeschlossenen Poren der Fahrbahn komprimiert. Verschwindet der Staudruck bei der Weiterfahrt, entspannt sich die Luft wieder. Diese Kompressions- und Dekompressionsvorgänge führen zu Schall im höheren Frequenzbereich und sind stark von der Gestalt und Porosität der Straßenoberfläche abhängig. [16]

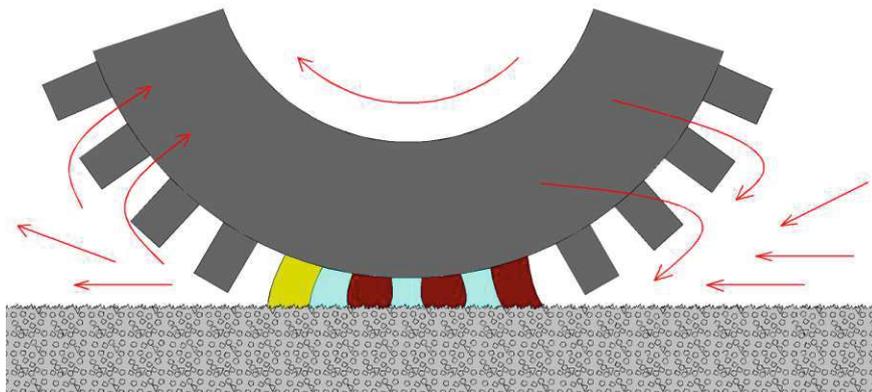


Abbildung 3.1: Air-Pumping-Effekt am rollenden Reifen. Eigene Darstellung nach [16]

Im Kontext der Schallabstrahlung ist der Horneffekt zu erwähnen. Die Straßenoberfläche bildet zusammen mit der Lauffläche des Reifens einen Schalltrichter, der die Abstrahlung des Schalls erheblich verstärkt und in Abbildung 3.2 blau dargestellt ist. Bei Frequenzen über 500 Hz kann dies zu einer Erhöhung um bis zu 20 dB führen. Dieses Phänomen ist stark von den Oberflächeneigenschaften abhängig und kann durch schallabsorbierende Deckschichten deutlich reduziert werden. [16]

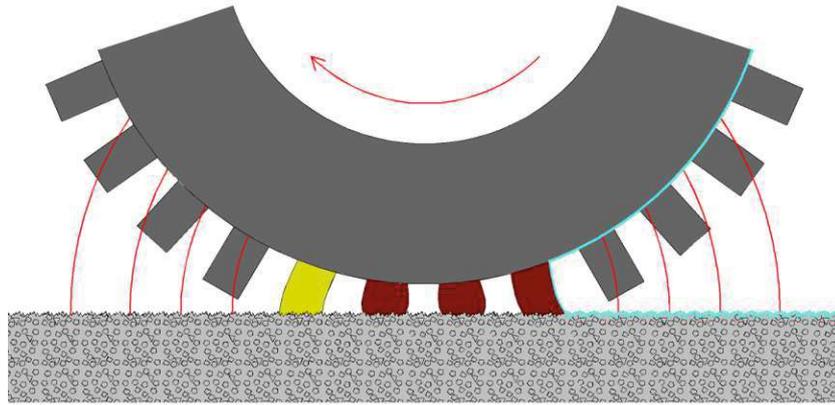


Abbildung 3.2: Horneffekt. Eigene Darstellung nach [16]

3.4 Messung von Straßenlärm

Um das Lärminderungspotential verschiedener Straßenbeläge erkennen und vergleichen zu können, muss entstehender Schall standardisiert gemessen werden. Dafür können einerseits die Schallimmission bei Vorbeifahrt, andererseits die Schallemission bei Überfahrt des Belages betrachtet werden. Im Folgenden werden die zur Verfügung stehenden Verfahren kurz erläutert.

Die immissionsbasierte SPB-Messung („statistical pass-by“) wird in ÖNORM EN ISO 11819-1 [17] geregelt. Dieses statistische Vorbeifahrtsverfahren dient der Ermittlung des entstehenden Verkehrsgeräusches, das von der Verkehrszusammensetzung und dem Straßenaufbau abhängig ist. Voraussetzungen sind frei fließender Verkehr und Geschwindigkeiten von mindestens 50 km/h. Beim Versuch werden die Fahrgeschwindigkeit, die Fahrzeugkategorie und der gemessene A-bewertete Schalldruckpegel vermerkt und aus diesem Messdatenkollektiv schließlich der statistische Vorbeifahrtindex (SPBI) berechnet. Der SPBI kann nun zum akustischen Vergleich verschiedener Straßenaufbauten herangezogen werden.

Zur Messung des Rollgeräusches stehen zwei Versuche zur Verfügung – einerseits die Messung nach RVS 11.06.64 [18] andererseits die Messung mittels CPX-Anhänger laut ÖNORM EN ISO 11819-2 [19].

Zur Emissionsmessung nach RVS [18] wird ein Prüfreifen mit Hilfe eines Anhängers gezogen. Er ist von einer schallabsorbierenden Abdeckung umgeben, um Umgebungslärm abzuschirmen und Schallreflexion zu vermeiden. Die entstehenden Geräusche werden durch zwei Mikrofone aufgezeichnet, die sich seitlich und hinter dem Rad befinden. Des Weiteren werden die Fahrbahntemperatur und die Fahrgeschwindigkeit gemessen. Unter standardisierten Bedingungen kann so das bei Überfahrt des Fahrbahnbelags entstehende A-bewertete Rollgeräusch im Nahfeld der Reifen-Fahrbahn-Kontaktfläche ermittelt werden.

Die CPX-Messung nach ÖNORM EN ISO 11819-2 [19] ähnelt jener nach RVS, wobei CPX für „close-proximity level“ – also Nahfeldmessung – steht. Wieder wird ein Rad an einem Anhänger gezogen, jedoch sind die beiden Mikrofone im 45 °-Winkel seitlich neben dem Rad angeordnet. Weiters werden hier anstatt eines Prüfreifens verschiedene, praxisnahe Reifen verwendet, um die entstehende Schallemission möglichst realitätsnah zu ermitteln.

Ein weiterer in diesem Kontext relevanter Versuch wird in ISO 13472-1 [20] geregelt. Zur Messung des frequenzabhängigen Schallabsorptionsgrades von Straßendeckschichten werden eine Schallquelle und ein Mikrophon über der zu prüfenden Oberfläche angeordnet. Durch Vergleich des abgegebenen und

des empfangenen Tons kann unter Berücksichtigung der längeren Laufzeit des reflektierten Schalls der Schallabsorptionsgrad der Straßenoberfläche berechnet werden.

3.5 Lärmminderung durch Straßenoberflächen

Es gibt verschiedene Ansätze zur Lärmminderung mittels Anpassung der Straßenoberfläche. Grundsätzlich lassen sich diese in Varianten mit dichter und mit offenporiger Deckschicht unterteilen. Als Oberflächenmaterial eignen sich sowohl Beton als auch Asphalt, wobei deren Eigenschaften speziell gewählt werden – die Menge und Sorte des Bindemittels, die Korngrößenverteilung und Kornform der Gesteinskörnung sowie die Texturierung der Oberfläche müssen bestmöglich aufeinander abgestimmt werden. [16] Im Folgenden werden verschiedene Möglichkeiten beschrieben.

3.5.1 Dichte Asphaltdeckschichten

Bei dichten Deckschichten ist die Textur wesentlich für die lrmmindernden Eigenschaften. Die Textur beschreibt die geometrische Abweichung der tatsächlichen Oberfläche von einer perfekten Ebene. Sie wird durch die räumliche Verteilung der Unebenheiten bestimmt und ist folglich ein Maß für die Rauigkeit der Fahrbahn. Ihre Gestalt kann in zwei Typen unterschieden werden: das konvexe „Gebirge mit Tälern“ und das konkave „Plateau mit Schluchten“, die beispielhaft in Abbildung 3.3 dargestellt sind. Grob lässt sich sagen, dass gewalzte Oberflächen meist konkav und abgestreute Deckschichten meist konvex sind.

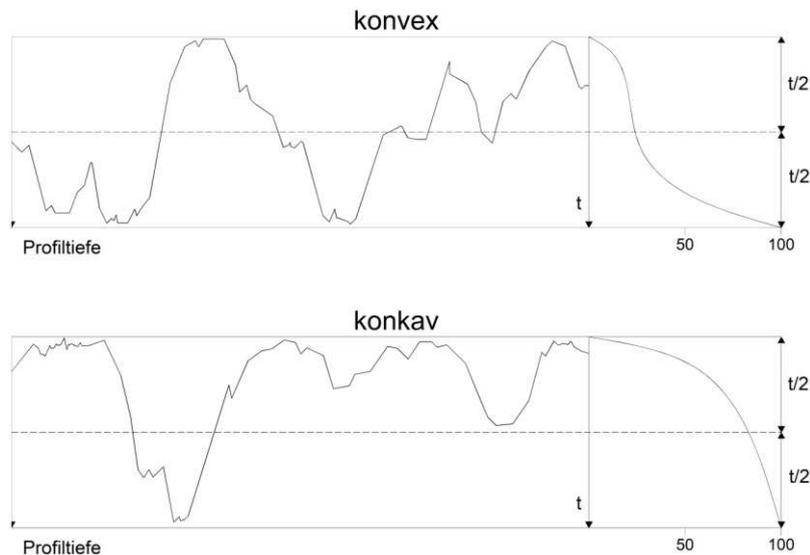


Abbildung 3.3: Konvexe und konkave Textur. Eigene Darstellung nach [21]

Die drei wichtigsten Parameter zur Beschreibung der Textur sind die maximale Rauigkeitstiefe, die Texturwellenlnge und der Gestaltfaktor. Sind diese gut aufeinander abgestimmt, kann dies gegenüber herkömmlichen Splittmastixasphalt 0/8 oder 0/11 zu einer Reduktion des Reifen-Fahrbahn-Geräusches um 2 dB bis 4 dB bei PKW-Überfahrt führen. Modellberechnungen prognostizieren sogar eine erreichbare Reduktion von 10 dB, wenn die Texturparameter optimiert werden. Für LKW-Reifen fällt das Minderungspotential mit circa 2 dB geringer aus. Die Auswahl einer Deckschichtmischung ist jedoch immer ganzheitlich durchzuführen, wobei die verschiedenen Zusammenhänge gegeneinander abgewogen werden müssen. Beispielsweise führt eine geringe Rauigkeitstiefe zu einer Reduktion der

mechanischen Anregung des Reifens im tiefen Frequenzbereich, verstärkt aber sowohl den Air-Pumping-Effekt als auch den Horneffekt und verschlechtert die Griffbarkeit. [16]

Splittmastixasphalt (SMA) ist ein sehr weit verbreiteter, dichter Straßenbelag und wird deshalb bei Betrachtung der Lärminderungseigenschaften von Deckschichten oft als Referenz verwendet. Ein kleineres Größtkorn verbessert die akustischen Eigenschaften, reduziert jedoch die Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit der Deckschicht bei hoher Belastung. Auch Asphaltbeton wird bereits seit vielen Jahren häufig unter anderem als Deckschicht eingesetzt. Bei innerörtlichen Geschwindigkeiten liegt die Lautstärke bei Überfahrt um 2 dB(A) bis 3 dB(A) unter jener von Splittmastixasphalt. Für den Einsatz bei höheren Geschwindigkeiten ist er jedoch aus lärmtechnischer Sicht schlechter geeignet, da der Air-Pumping-Effekt durch die dichte Oberfläche verstärkt wird. [21]

Lärmoptimierte Asphaltdeckschichten (AC D LOA, ehemals LOA D) stellen eine jüngere Entwicklung dar. Mit einem Hohlraumgehalt von 5 % bis 7 %, einer optimierten Sieblinie und einem Größtkorn von 5 mm wird eine Textur erzeugt, durch die bei PKW-Überfahrt eine Lärmreduktion von 3 dB(A) erreicht werden kann. Um eine hohe Stabilität und Dauerhaftigkeit zu garantieren, ist die Verwendung eines modifizierten Bindemittels dringend erforderlich. Beim Einbau ist auf eine hohe Ebenheit der Unterlage und auf rein statische Verdichtung zu achten. [21] Der Belag eignet sich nicht für Flächen mit hoher Torsions- oder Schubbeanspruchung, die bei engen Kurvenradien oder bei Busbuchten auftreten. Außerdem sollte die Anzahl von Einbauten und späteren Aufgrabungen minimiert werden. [22] Wie sich die akustischen Eigenschaften im Laufe der Zeit verändern, wird von verschiedenen äußeren Faktoren, wie Belastung und Verschmutzung, beeinflusst – es ist jedenfalls mit einer Abnahme der Pegelminderung zu rechnen. [21] Die „Empfehlungen für die Planung und Ausführung von lärmtechnisch optimierten Asphaltdeckschichten aus AC D LOA und SMA LA“ der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) [22] geben wichtige Hinweise zur richtigen Errichtung.

Eine weitere Möglichkeit, den lärmindernden Einfluss der Textur zu nutzen, stellen Gussasphaltdeckschichten mit speziellen Abstreusplitten dar. Gussasphalt ist im heißen Zustand flüssig, weshalb er bei einer Einbautemperatur von mehr als 200 °C gegossen wird. Ohne zusätzliche Verdichtung ergibt sich so ein sehr geringer Hohlraumgehalt von unter 1 Vol.-%. Zur Lärminderung werden folglich nicht die Poren, sondern die Oberflächentextur herangezogen, die durch das Eindringen von vorumhüllten Abstreusplitten entsteht. [23] Mittels mehrerer Versuchsabschnitte wurden in einer Untersuchung im Auftrag des Bundesamtes für Straßen [24] verschiedene Abstreusplitte getestet und deren akustische Eigenschaften über fünf Jahre hinweg untersucht. Es zeigte sich, dass sich die Lärminderung nach einem Jahr Einfahrzeit um etwa 1 dB(A) verbessert und danach bis zum Ende der Liegezeit, die auf 30 Jahre geschätzt wird, stagniert. Je nach verwendetem Abstreusplitt liegt sie nach fünf Jahren für Mischverkehr mit 8 % Schwerverkehrsanteil zwischen 1,6 dB(A) und 3,9 dB(A). Einen wesentlichen Einfluss haben dabei die Kornform und die Plattigkeitskennzahl. Am besten schnitt im genannten Forschungsprojekt ein künstlicher Splitt aus Schmelzkammerschlacke mit einer Korngröße von 1,4 mm bis 2,8 mm ab, der eine dauerhafte Lärminderung von etwa 4 dB(A) erzielte. Daraus ergeben sich folgende Empfehlungen für kornformoptimierte Abstreusplitte aus Locker- oder Festgestein: Kornbereich 2 mm bis 4 mm, Über- und Unterkorn < 5 M.-%, kubische und gleichkörnige Kornform, Plattigkeitskennzahl < 2 M.-%. [23] Aufgrund ihrer guten Dauerhaftigkeit und lärmindernden Eigenschaften ist diese Bauform besonders für den großflächigen Einsatz und bei hohem Schwerverkehrsanteil – beispielsweise auf Autobahnen – geeignet. [21]

Im Zuge der Straßenerhaltung werden häufig dünne Asphaltdeckschichten in Heiß- oder Kaltbauweise verwendet. Aufgrund der gewünschten geringen Schichtdicke wird meist zu feinkörnigem Zuschlag gegriffen, weshalb die entstehende Decke akustische Vorteile aufweist. Bei innerörtlichen Geschwindigkeiten kann eine Lärminderung von 1 dB(A) gegenüber Splittmastixasphalt erreicht werden. [21]

3.5.2 Offenporige Asphaltdeckschichten

Offenporiger Asphalt (OPA) wird aufgrund seiner lärmindernden Eigenschaften auch Flüsterasphalt genannt. Die einschichtige Regelbauweise weist durch ihre spezielle Zusammensetzung mit geringem Feinanteil eine besonders hohe Porosität von 22 Vol.-% bis 28 Vol.-% auf. [25] Wichtig ist neben der Anzahl der Hohlräume deren Vernetztheit, die den Schallabsorptionsgrad maßgeblich beeinflusst, sodass er für bestimmte Frequenzen bei bis zu 90 % liegen kann. [16] Die durchgängigen Poren vermeiden den Air-Pumping-Effekt, da Luft bei Überfahrt nicht komprimiert wird, sondern ins Hohlraumssystem ausweichen kann. Des Weiteren fungiert die poröse Deckschicht als Schallabsorber, der den Horneffekt und die Reflexion des Antriebsgeräusches an der Oberfläche verringert. In welchem Frequenzbereich diese Absorption wirksam ist, hängt von der Schichtdicke ab, wobei dickere Schichten tiefere Frequenzen aufnehmen. [21] Um den besten Effekt zu erzielen, muss die am besten aufnehmbare Frequenz der Hauptfrequenz des Reifen-Fahrbahn-Geräusches entsprechen. Dies macht eine spezifische Anpassung an die örtlichen Gegebenheiten erforderlich, da die Fahrgeschwindigkeit und Verkehrszusammensetzung einfließen müssen. [16]

Die größten Nachteile dieser Bauweise sind eine geringe Dauerhaftigkeit und eine kurze Lebensdauer. Durch das Verstopfen der Poren sinkt die Lärminderung von anfänglich bis zu 10 dB(A) im Laufe der Zeit auf etwa 5 dB(A). [21] Reinigungsmaßnahmen zeigen nur geringe Wirksamkeit und obwohl schnell fahrende Fahrzeuge durch den erzeugten Unterdruck einen Teil der Verschmutzung aus den Poren entfernen, ist die akustische Lebensdauer auf wenige Jahre begrenzt. [25] Darüber hinaus ist die Oberfläche besonders anfällig für verkehrsbedingte Kornausrüche, die das Reifen-Fahrbahn-Geräusch verstärken und die Erneuerungsintervalle verringern. Aus diesen Gründen liegt die akustische Haltbarkeit nur bei etwa acht Jahren und die bautechnische Lebensdauer je nach Verkehrsstärke und -zusammensetzung bei maximal 12 Jahren. [21]

Durch die Verwendung von zweilagigem offenporigem Asphalt können einige der genannten Probleme vermieden werden. Diese Sonderform besteht aus zwei Schichten, wobei die obere eine feine Körnung von 4 mm bis 8 mm und die untere ein Größtkorn von 16 mm aufweist. So ergibt sich ein Hohlraumgehalt von etwa 27 Vol.-% und eine Gesamtschichtdicke von circa 70 mm. Betrachtet man die akustischen Eigenschaften, zeigt sich, dass beide Schichten zur Lärminderung beitragen und so ein größeres Spektrum abdecken – statt einem gibt es zwei Maxima der frequenzabhängigen Absorption. Durch Anpassung der Schichtdicken können diese gut auf den erwarteten Frequenzbereich abgestimmt werden. Ein weiterer Vorteil liegt in der geringeren Verschmutzungsanfälligkeit, die auf die Siebwirkung der oberen Schicht zurückzuführen ist. Grober Schmutz kann nicht in das Hohlraumssystem eindringen, feinere Partikel werden durch den guten Wasserabfluss in den großen Poren der unteren Lage leichter ausgewaschen. Aus diesen Gründen ist zweilagiger offenporiger Asphalt besser als die einlagige Regelbauweise für die innerörtliche Anwendung mit geringen Fahrgeschwindigkeiten geeignet. [16] [21]

Eine weitere neuere Entwicklung stellt der lärmarme Splittmastixasphalt (SMA LA) dar, der wegen seines Hohlraumgehalts von 10 Vol.-% bis 15 Vol.-% als semi-porös bezeichnet werden kann. Durch

einen geringen Feinkornanteil und ein angepasstes Bindemittel werden eine höhere Porosität und eine günstigere Textur erreicht, wodurch je nach Einsatzort eine Lärminderung von 2 dB bis 4 dB erzielt werden kann. Diese Bauform zeichnet sich durch ein gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis aus. Die Errichtungs- und Erhaltungskosten liegen zwar über jenen für regulären Splittmastixasphalt, jedoch deutlich unter jenen für offenporigen Asphalt. Auch die Lebensdauer ist im Vergleich zur offenporigen Alternative länger. [21] Lärmarme Splittmastixaspalte können bei allen Belastungsklassen verwendet werden, die akustischen Vorteile sind erfahrungsgemäß bei Geschwindigkeiten von über 50 km/h am höchsten. Die Einschränkungen ähneln jenen der lärmoptimierten Asphaltdeckschichten. [22] Wieder sollten bei der Planung die „Empfehlungen für die Planung und Ausführung von lärmtechnisch optimierten Asphaltdeckschichten aus AC D LOA und SMA LA“ der FGSV [22] herangezogen werden.

Gussasphalt kann ebenfalls offenporig hergestellt werden (PMA). Die angepasste Mixtur enthält einen höheren Anteil an grober Gesteinskörnung. Dadurch nimmt die Porosität der eingebauten Schicht mit zunehmender Tiefe ab. Die Oberfläche erinnert an porösen Asphalt, ihre Textur weist ein „Plateau mit Schluchten“ auf. Die wasserundurchlässige Schicht muss nicht verdichtet werden, einige Walzübergänge sind aber zur Herstellung der Ebenheit erforderlich. Durch die Oberflächentextur kann bei Gussasphalt mit offenporiger Oberfläche eine Lärmreduktion von 4 dB im Vergleich zu herkömmlichem Gussasphalt erreicht werden. [21]

3.5.3 Dichte Betondeckschichten

Auch bei dichten Deckschichten aus Beton ist die Textur für die Lärminderung wesentlich, wobei die gleichen Mechanismen, wie bereits für Asphaltdecken beschrieben, wirksam werden. Allen voran sind Waschbetonoberflächen zu nennen. Zur Herstellung der besonderen Makrotextur, die einem „Plateau mit Schluchten“ entspricht, wird nach dem Einbau ein Oberflächenverzögerer aufgebracht und die obere Mörtelschicht nach entsprechender Wartezeit ausgebürstet. Die resultierende Textur wird durch die Profilspitzenanzahl als Maß für die Oberflächenhomogenität und die mittlere Texturtiefe beschrieben. Letztere soll bei etwa 0,8 mm liegen, um eine ausreichende Griffigkeit und möglichst gute Lärmreduktion zu erreichen. Als Gesteinskörnung eignen sich Edelsplitt mit stetiger oder intermittierend gestufter Sieblinie und einem Größtkorn von 8 mm, wobei auf eine hohe Polierresistenz Wert zu legen ist. So kann bei hoher Lebensdauer eine Lärmreduktion von 2 dB(A) erreicht werden. [26] [27] Eine Studie des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT) in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Wien aus dem Jahr 2005 zeigte, dass die vorteilhaften akustischen Eigenschaften auch nach einer Liegezeit von über zehn Jahren bestehen bleiben. [28]

Die Waschbetonbauweise ersetzt daher immer mehr die früher häufig angewendeten Texturierungsart mittels Besenstrich und Jutetuch. Durch Erzeugung einer Struktur quer zur Fahrriichtung mittels Besenstrich kann eine sehr gute Griffigkeit erzielt werden, diese Oberfläche weist aber äußerst schlechte akustische Eigenschaften auf. Die Texturierung mittels Jutetuch führt zwar zu einer Lärmreduktion um 2 dB(A), jedoch verschlechtert sich die Griffigkeit mit den Jahren signifikant. Aus diesen Gründen stellt die griffige und dauerhafte Waschbetonoberfläche seit vielen Jahren die Regelbauweise für Betonstraßen dar. [27]

Aktuelle Forschung beschäftigt sich mit der Frage, ob eingebaute Waschbetonoberflächen mittels Horizontalschleifverfahren noch weiter verbessert werden können. Ziel ist es, durch die Erzeugung eines idealen Plateaus und Optimierung der Mikrotextur der Profilspitzen die Griffigkeit und

Lärmreduktion weiter zu erhöhen. Im Fokus der Untersuchungen stehen die optimale Abtragtiefe und die Frage der Praxistauglichkeit. [26]

Eine bereits bekannte Möglichkeit, die Oberflächentextur bestehender Betondecken gezielt zu gestalten, stellt das Grindingverfahren da. Mittels Diamantschleifscheiben wird eine längsgerichtete Struktur in den Beton eingeschnitten. Früher wurde dieses Verfahren hauptsächlich zur Wiederherstellung der Griffigkeit und Ebenheit verwendet, heute dient es auch zur gezielten Verbesserung der akustischen Eigenschaften. Mit gut gewählter Steg- und Rillenbreite sowie -tiefe kann eine Lärmpegelreduktion von mindestens 2 dB(A) erreicht werden. [21] Bei Anwendung im Bestand ist auf eine ausreichend dicke Betondecke zu achten. Im Neubau stellt die Grinding-Oberfläche eine Alternative zum Waschbeton da, wobei aus kosten- und verfahrenstechnischen Gründen auf Edelsplitt als Gesteinskörnung verzichtet werden sollte. [26]

3.5.4 Offenporige Betondeckschichten

Auch aus Beton können poröse Deckschichten hergestellt werden. Dabei kann das Reifen-Fahrbahngeräusch deutlich reduziert werden, da die zugänglichen, verbundenen Poren den Air-Pumping-Effekt vermeiden und die Deckschicht wegen der hohen Porosität als Schallabsorber dient. Um einen Absorptionsgrad von über 90 % zu erzielen, ist ein Mindesthohlraumgehalt von 18 Vol.-% einzuhalten. So kann eine Pegelreduktion von 7 dB(A) erreicht werden. Weitere Vorteile stellen das gute Drainagevermögen und die Verformungsbeständigkeit dar. Da Zementstein anders als Bitumen nicht klebrig ist, ist eine offenporige Betondecke auch weniger verschmutzungsanfällig als solche aus Asphalt, was gemeinsam mit der einfacheren Reinigung des Hohlraumsystems eine Nutzungsdauer von etwa zehn Jahren ermöglicht. Durch die hohe Porosität verschlechtern sich jedoch die Festigkeit und Dauerhaftigkeit, die deutlich unter jener von dichten Betonoberflächen liegt. [26]

Die Offenporigkeit kann auf verschiedene Arten umgesetzt werden. Einerseits kann sich das durchgängige Porensystem über die gesamte Querschnittshöhe erstrecken. In diesem Fall spricht man von einem sogenannten Drainagebeton oder Drainbeton, da Wasser an der Straßenoberfläche versickern kann, wodurch der Oberflächenabfluss reduziert wird. Auf diese Bauart wird in Kapitel 5 näher eingegangen. [29]

Andererseits kann eine poröse Oberbetonschicht auf dichtem Unterbeton aufgebracht werden. Die guten akustischen Eigenschaften bleiben bestehen, gleichzeitig wird die Wirtschaftlichkeit erhöht – falls erforderlich, kann die weniger dauerhafte Deckschicht mehrmals erneuert werden, ohne den gesamten Straßenaufbau ersetzen zu müssen. Für die Gesteinskörnung soll eine intermittierend gestufte Sieblinie und eine gedrungene Kornform gewählt werden. Wichtig ist ein guter Verbund zwischen den beiden Schichten. Um eine Zementsteinanreicherung an der Oberfläche zu vermeiden, müssen der Leimgehalt und die -viskosität, die Konsistenz und die Einbauart aufeinander abgestimmt werden. [26] So soll ein circa 1 cm starker, hohlraumreicher Bereich an der Oberfläche geschaffen werden, da der Zementleim beim Einbau durch die aufgebrachte Verdichtungsenergie absinkt. Außerdem ist auf eine hohe Ebenheit und ausreichende Griffigkeit zu achten. [30]

3.5.5 Pflasterdecken

Im Hinblick auf die Lärmemission erweisen sich herkömmliche Pflasterdecken stets als nachteilig, obwohl ihre Messergebnisse breit streuen. Die Pegelerhöhung ist dabei von der genauen Ausführung des Pflasters, dem Fahrzeugkollektiv und der Geschwindigkeit abhängig und liegt zwischen 3 dB und 8 dB verglichen mit Asphaltbeton. [9] Besonders die in historischen Stadtzentren beliebten

Kopfsteinpflaster sind bei Befahrung durch Lastkraftwagen und höheren Fahrgeschwindigkeiten akustisch ungeeignet und sollten durch lärmarme Alternativen ausgetauscht werden. [11] Als eher günstig erweisen sich ebene Pflaster mit geringer Fugenbreite und kleinen Pflastersteinen. Hier kommt es zu einer Erhöhung von nur 2 dB bis 3 dB. Sie sollten dennoch nur in Bereichen mit Fahrgeschwindigkeiten bis max. 30 km/h angewendet werden. [9]

Laut „Handbuch Umgebungslärm“ des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft [11] gelten folgende allgemeine Aussagen:

- Ebene Pflaster mit großformatigen Steinen sind grundsätzlich leiser.
- Bogenpflasterungen sind leiser als rechtwinkelig überfahrene Reihenpflaster.
- Lose Steine und tiefe Fugen sind zu vermeiden.
- Pflasterungen sollten großflächig ausgeführt werden, da der Wechsel zwischen zwei Straßenbelägen als akustisch störend empfunden wird.

In den letzten Jahren gewinnen innerorts Pflaster aus großformatigen Betonsteinen immer mehr an Beliebtheit, die bei richtiger Ausführung gegenüber Asphaltdecken keinen akustischen Nachteil bzw. sogar einen Vorteil haben. Bei der Verlegung ist dabei ein besonderer Fokus auf die Fugenausbildung zu legen. [31] Eine Weiterentwicklung dieser stellen akustisch vorteilhafte, offenporige Betonpflastersteine da. Mit optimiertem Betonmischgut können poröse zweischichtige Pflastersteine hergestellt werden, die sowohl gute Dauerhaftigkeits- als auch gute akustische Eigenschaften aufweisen. Der erreichbare Schallabsorptionsgrad liegt zwischen 0,55 und 0,82. Innerorts kann damit im Neuzustand eine Lärminderung von über 7 dB(A) gemessen werden. [32] Ein Vorteil gegenüber der akustisch vergleichbaren Bauweise mit offenporigem Ort beton ist die gleichbleibend hohe Qualität der Steine, die durch die industrielle Fertigung unter festgelegten Bedingungen garantiert werden kann. Optisch vorteilhaft ist die einfache Wiederherstellung des ursprünglichen Straßenbildes nach Aufgrabungen. [33]

Abbildung 3.4 veranschaulicht die vorgestellten Straßenbeläge und ihre akustischen Eigenschaften. Zu beachten ist, dass die Ordinate die durchschnittlich zu erwartende Schallpegelminderung angibt – negative Werte führen folglich zu einer erhöhten Lärmbelastung.

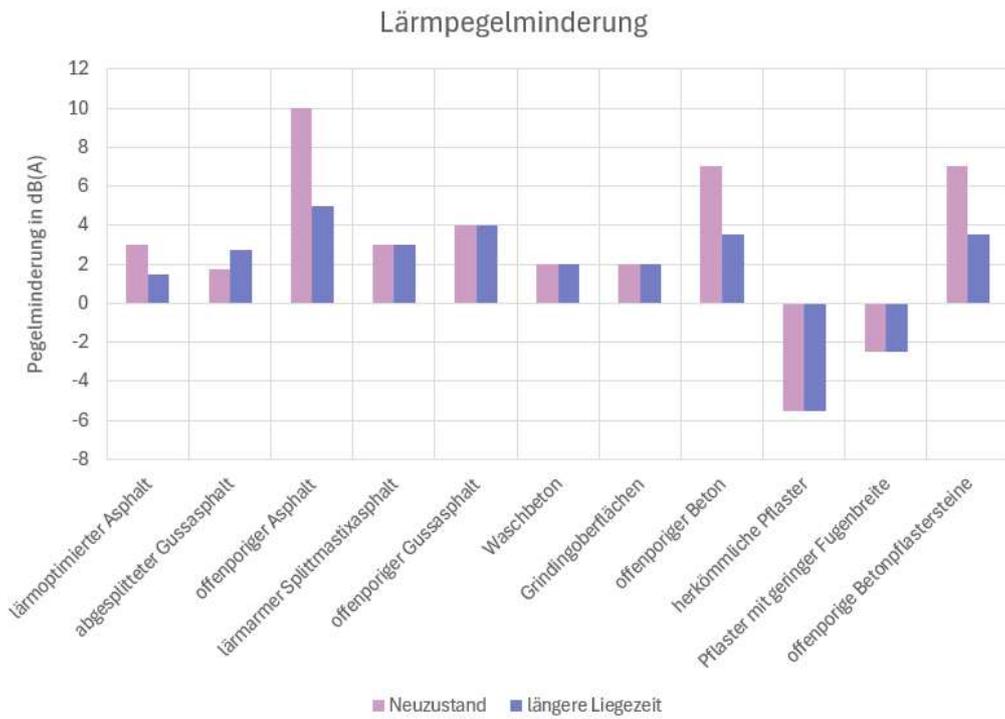


Abbildung 3.4: Durchschnittliche Schallpegelminderung verschiedener Straßenoberflächen verglichen mit Splittmastixasphalt. Eigene Darstellung unter Verwendung von [9], [21], [24], [26], [27], [32]

4 Wärmeentwicklung und Hitzeinseln

Bis zum 26. August wurden 2024 bereits 42 Tropennächte, also Nächte, in denen die Temperatur nicht unter 20 °C fällt, im Zentrum Wiens aufgezeichnet und so der bisherige Rekord von 41 Nächten aus dem Jahr 2019 übertroffen. Die Messstation Hohe Warte am grünen Rande Wiens registrierte hingegen nur 22 Tropennächte. [34] Wie es zu dieser Differenz kommt und welchen Einfluss verschiedene Straßenbauweisen darauf haben können, wird in diesem Kapitel erläutert.

4.1 Hitzeinseln in urbanen Gebieten

Der Klimawandel ist ein globales Phänomen, das auch in Österreich spür- und messbar ist. Hierzulande liegt der Temperaturanstieg sogar über dem globalen Mittel, was auf die großen Land- und geringen Wasserflächen zurückzuführen ist. [35] In urbanen Gebieten wird diese Erwärmung weiter verstärkt. Neben Faktoren, wie Stadtgröße, Topografie und Bebauungsstruktur, die nicht Teil dieser Arbeit sein werden, beeinflussen auch die verwendeten Baumaterialien und der Versiegelungsgrad das Stadtklima. Unzählige Wechselwirkungen machen diesen multifaktoriellen Effekt noch komplizierter. Hindernisse, wie Gebäude, bremsen Windströmungen und stören so die Zirkulation von Luft, was sich negativ auf die nächtliche Abkühlung und die vorhandene Luftqualität auswirkt. [12]

Klassische Baumaterialien, beispielsweise Beton und Asphalt, weisen eine hohe Wärmespeicherkapazität und Wärmeleitfähigkeit auf. [12] Urbane Oberflächen, wie Straßen und Hausdächer, absorbieren und speichern daher die eingestrahlte Solarenergie länger als Grünflächen, was zu einer erhöhten Aufwärmung am Tag und einer reduzierten nächtlichen Abkühlung führt. Dadurch können in Sommernächten Temperaturunterschiede von mehr als 10 °C zwischen Stadt und Umland gemessen werden. Städte bilden daher sogenannte „urbane Hitzeinsel“ (englisch: „Urban Heat Island“). [36] Durch die fortschreitende Erwärmung gewinnen Klimaanpassungsmaßnahmen an Wichtigkeit, die in [37] folgende Kategorien unterteilt werden:

- Blau** Entsiegelung von Flächen
- Grün** Begrünung von städtischen Oberflächen und Schaffung von Grünflächen
- Weiß** Erhöhung des Reflexionsvermögens durch Aufhellung urbaner Oberflächen
- Grau** Beschattung

Eine Kombination dieser Maßnahmen ist anzustreben und hat sich schon in einigen Städten bewährt. Wie diese Anpassungsstrategien in die Dimensionierung von Straßen einfließen können, wird in den folgenden Kapiteln erläutert, wobei der Fokus auf die Kategorien „Weiß“ und „Blau“ gelegt wird.

Die Kategorien „Grün“ und „Grau“ betreffen weniger die konkrete Straßenplanung, sondern mehr die Stadt- und Raumplanung. Aus diesem Grund werden sie im Folgenden, mit Ausnahme des in Kapitel 5.4 erklärten Schwammstadt-Prinzips, nicht genauer behandelt. Allgemein ist zu sagen, dass urbanes Grün hilft, die Temperatur und Luftfeuchtigkeit zu regulieren und so den Hitzeinseleffekt abzuschwächen. Dies passiert durch die Beschattungswirkung der Bäume, durch die erhöhte Verdunstung und die geringe Wärmespeicherung. Die Bebauung einer Stadt beschattet zwar ebenfalls teilweise die Straßen, vergrößert aber die aufheizbare Oberfläche und behindert die Windströmung, was das Stadtklima und die vorherrschende Luftqualität beeinträchtigt. [12] Diese wichtigen städtebaulichen Aspekte sind aber nicht Teil dieser Arbeit.

4.2 Einflussfaktoren auf die Wärmeentwicklung

Die Temperatur an der Straßenoberfläche und der Temperaturverlauf im Inneren des Straßenkörpers verändern auch die Temperatur der darüberliegenden Luftschicht und sind von verschiedenen Faktoren abhängig. Dazu zählen:

- das Reflexionsvermögen der Oberfläche,
- die Farbe der Oberfläche,
- die Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Straßenbaumaterialien,
- die Wärmekapazität der verwendeten Straßenbaumaterialien,
- die Porosität der verwendeten Straßenbaumaterialien,
- der Schichtaufbau und die Schichtdicken.

Diese beeinflussen sich zum Teil gegenseitig und haben wiederum Einfluss auf andere entscheidende Faktoren, wie die Straßendurchlässigkeit sowie den allgemeine Versiegelungsgrad. [38] Beispielsweise verändert eine Erhöhung der Porosität das Wärmespeicher- und Reflexionsvermögen der Straße, und hat durch die verringerte Tragfähigkeit Einfluss auf den zu wählenden Straßenaufbau. In dieser Arbeit werden deshalb vorrangig das Reflexionsvermögen und die Porosität der Deckschicht behandelt, da dies die relevantesten und in der Praxis am häufigsten diskutierten Eigenschaften sind.

4.2.1 Reflexionsvermögen von Straßenbelägen

Trifft Energie in Form von Sonnenlicht auf eine Oberfläche, wird ein Teil davon reflektiert und ein anderer absorbiert, was zur Erwärmung führt. Die Aufteilung ist dabei vorrangig von der Farbe abhängig – das Reflexionsvermögen nimmt ab, je dunkler eine Fläche ist. Zur Angabe wird der Wert „Albedo“ verwendet, der den prozentuellen Anteil der kurzwelligigen Strahlung angibt, der beim Auftreffen auf eine nicht leuchtende und nicht spiegelnde Oberfläche diffus reflektiert wird. Da langwellige Strahlung kaum zu einer Erwärmung führt, wird sie meist vollkommen vernachlässigt. [12] Eine Erhöhung der Albedo um 10 % kann die maximale Oberflächentemperatur um nahezu 4 °C reduzieren. [39] Die Albedo liegt für Beton zwischen 10 % und 40 % und für Asphalt bei 5 % bis 25 %, was auf das schwarze Bitumen zurückzuführen ist. Besonders groß ist der Unterschied im Neuzustand. Bei längerer Liegedauer wird der dunkle Bindemittelfilm an der Straßenoberfläche durch Verkehr und Witterung abgetragen und das Korngerüst freigelegt, wodurch sich Asphaltstraßen innerhalb der ersten 1,5 Jahre deutlich aufhellen. Die Albedo von Betonoberflächen sinkt hingegen im Laufe der Zeit. [40]

Mit dem Ziel, die Aufheizung von Straßen durch eine Erhöhung der Albedo zu verringern, beschäftigt sich die Forschung schon seit der Mitte des letzten Jahrhunderts. In Hamburg werden beispielsweise schon seit den 1950er-Jahren „aufgehellte“ Asphaltdeckschichten gebaut. Die Aufhellung geschieht durch die Beimischung von heller Gesteinskörnung, die natürlich oder künstlich gebrannt sein kann. Der empfohlene Anteil liegt je nach Belastungsklasse bei 12 M.-% bis 25 M.-%. Bei Verwendung von 25 M.-% Aufhellungsgestein können Splittmastixasphaltdecken eine um 8 °C kühlere Oberflächentemperatur als reguläre Asphaltdeckschichten aufweisen, ihre Albedo liegt folglich über 10 % höher. Auch wenn sich diese Sonderbauweise vorteilhaft auf das städtische Mikroklima auswirken kann, ist darauf hinzuweisen, dass die Erzeugung von künstlichem Aufhellungsgestein durch den Brennprozess bei 1.200 °C sehr energieintensiv und natürliches Aufhellungsgestein nicht überall vorhanden ist. Die Produktion und der Transport sollten daher unbedingt bei der Planung berücksichtigt werden. [40]

Eine weitere Möglichkeit, die Albedo von Asphaltstraßen zu erhöhen, stellt die Verwendung eines farblosen oder eingefärbten Bindemittels dar. Statt Bitumen kann Epoxidharz verwendet oder dem Asphaltmischgut farbige Pigmente zugefügt werden. [38] Fraglich ist hier aber, wie sinnvoll diese Maßnahmen langfristig sind, da wie bereits erwähnt der Bindemittelfilm an der Oberfläche mit der Zeit abgetragen wird. [40]

Beim Bau von Betonstraßen können durch Zusatzstoffe nicht nur die mechanischen Eigenschaften, sondern auch die Albedo beeinflusst werden. Durch die Zugabe von Schlacke kann das Reflexionsvermögen der Betonoberfläche auf nahezu 60 % gehoben werden. Flugasche hat aufgrund der dunklen Farbe den gegenteiligen Effekt – dieser kann durch die zusätzliche Beimengung von Schlacke jedoch ausgeglichen werden. Aus umwelttechnischer Sicht hat die Verwendung von Zusatzstoffen aber in jedem Falle Sinn, da dadurch der Zementbedarf sinkt und damit eine große Menge CO₂ eingespart werden kann. [38]

Möglichkeiten zur Erhöhung der Albedo gibt es aber nicht nur im Neubau. Zur Instandsetzung oder Ertüchtigung von Asphaltstraßen können Whitetopping-Decken angewendet werden. Dabei wird eine dünne Schicht aus oft fasermodifiziertem Beton auf die geschädigte Asphaltfläche aufgebracht. [41] Messungen an Whitetopping-Versuchsfeldern ergaben eine Reduktion der Oberflächentemperatur um etwa 10 °C verglichen mit Asphaltflächen. Die geringste Temperatur wurde durch die Verwendung von Weißzement anstatt herkömmlichen Zements erreicht, der Unterschied ist jedoch vernachlässigbar. [42]

Eine Reduktion der Straßenoberflächentemperatur durch Erhöhung des Rückstrahlvermögens hat auch Vorteile für den Betrieb. Einerseits wirkt sich der hellere Straßenraum besonders nachts positiv auf die Sicht und so die Verkehrssicherheit aus. [40] Andererseits kann so die Dauerhaftigkeit mancher Straßenbeläge erhöht werden. Da Bitumen stark temperaturabhängige Eigenschaften aufweist, können Schäden, wie Spurrinnenbildung, „Bluten“ oder die Alterung von Asphalt, durch eine Temperatursenkung vermieden oder zeitlich verschoben werden. Bei geringeren Temperaturschwankungen können außerdem günstigere Bindemittel verwendet werden. Alle diese Effekte wirken sich positiv auf die Lebenszykluskosten aus. [39]

Simulationen von Straßenabschnitten in Wien zeigen jedoch mögliche Nachteile der Albedoerhöhung auf. Hierfür wurden einerseits Asphaltstraßen mit einer Albedo von 12 %, andererseits hochreflektierende Betonstraßen mit einer Albedo von 57 % betrachtet. Wie zu erwarten, traten bei den Asphaltdecken deutlich höhere Oberflächentemperaturen auf. Jedoch war die mittlere Strahlungstemperatur, die Aussagen über die thermische Belastung von Menschen zulässt, bei den Betonstraßen höher als bei den Asphaltstraßen, was sich negativ auf das menschliche Wohlbefinden auswirkt. Die reflektierte kurzwellige Strahlung kann die Strahlenbelastung auf Fußgänger*innen so sehr erhöhen, dass die positiven Effekte aus der Verringerung der Oberflächen- und Lufttemperatur wieder kompensiert werden. [43] Krispel et al. [42] bestätigten diese Ergebnisse durch Messungen an Versuchsfeldern in Wien. Hierfür wurden Probeflächen mit verschiedenen Asphalt- und Betonaufbauten errichtet und die Temperaturentwicklung beobachtet. Wieder zeigte sich, dass die Asphalt- und Gussasphaltfelder die höchsten Oberflächentemperaturen entwickeln, wohingegen die helle Whitetopping-Probefläche am kältesten blieb. Die gemessene Differenz lag bei 11 °C. Mittels Temperatur- und Strahlungsmessungen konnten außerdem Aussagen über die thermische Belastung auf den Menschen gemacht werden. Die mittlere Strahlungstemperatur, in die neben der Lufttemperatur auch die lang- und kurzwellige Strahlenbelastung einfließt, erreichte bei der Whitetopping-Fläche ein Maximum von 74,9 °C, bei der Asphaltfläche hingegen nur einen Wert von

66,3 °C. Auch der thermische Stress-Index der Betonflächen lag über den Werten für die Asphaltflächen. Um diese zusätzliche Belastung auf Fußgänger*innen zu vermeiden, stehen raumplanerische Möglichkeiten zur Verfügung. Beispielsweise könnte ein hochreflektierender Straßenbelag gewählt werden, während der Gehweg in Asphaltbauweise ausgeführt wird. Außerdem könnten Straße und Gehsteig durch eine Hecke oder Wand getrennt werden, um die reflektierte Strahlung abzuhalten. [42] Die Komplexität dieses Themas wird auch durch die Ergebnisse einer amerikanischen Studie [44] unterstrichen. Diese untersuchte den Verlauf der Lufttemperatur in Gassen mit verschiedenen Straßenbelägen in Chicago. Dabei zeigte sich, dass im realen städtischen Umfeld bei der Planung einer Straße nicht nur diese selbst, sondern auch die dreidimensionalen Rahmenbedingungen berücksichtigt werden müssen. In Straßencanyons mit hoher vertikaler Bebauung kann die vom Straßenbelag reflektierte Strahlung von den Wänden aufgenommen werden und die Aufheizung dieser verstärken, was zu einer Erhöhung der Lufttemperatur führen kann. Über stark reflektierendem Beton konnte so tagsüber in 3 m Höhe eine Erwärmung von bis zu 0,9 °C im Vergleich zur herkömmlichen Asphaltstraße gemessen werden, wobei ein starker Einfluss der vorherrschenden Windgeschwindigkeit gefunden wurde. Ein Effekt der Albedoerhöhung auf die nächtliche Temperatur wurde hingegen nicht festgestellt. Die Autoren folgern daraus, dass reflektierende Beläge bei offenen Flächen, wie Parkplätzen, eine sinnvolle Maßnahme zur Reduktion der Oberflächentemperatur sein können, im städtischen Kontext jedoch nur mit Vorsicht und unter Berücksichtigung aller Randbedingungen angewendet werden sollten. [44]

Die Vor- und Nachteile der Erhöhung des Reflexionsvermögens können wie folgt zusammengefasst werden. Positiv anzumerken sind die einfache Umsetzung und die breite Einsetzbarkeit, da die mechanischen Eigenschaften der Straßendeckschichten nicht verändert werden. Nachteile stellen höhere Materialkosten, eine durch Verschmutzung geringe Haltbarkeit der Aufhellung und eine potenzielle Blendwirkung für Verkehrsteilnehmer da. [45] Eine Nichtberücksichtigung der räumlichen Gegebenheiten kann den kühlenden Effekt der Albedoerhöhung verringern oder sogar aufheben. [44] Des Weiteren sind Fußgänger*innen durch die reflektierte Strahlung einer höheren thermischen Belastung ausgesetzt. [42]

4.2.2 Porosität der Straßenoberfläche

Obwohl poröse Materialien aufgrund ihrer größeren Oberfläche weniger Strahlung reflektieren als dichte, können sie trotzdem thermische Vorteile aufweisen. Im trockenen Zustand kann es tagsüber zwar zu höheren Oberflächentemperaturen kommen, die Temperatur im Inneren der Straße steigt jedoch nicht höher als bei der dichten Variante. Durch ihre geringere Dichte speichern sie außerdem weniger Wärme, weswegen nachts weniger Hitze an die Luft abgegeben wird. Dies erlaubt eine stärkere nächtliche Abkühlung der Stadt. Bei Regen oder Befeuchtung kann Wasser in die Poren eindringen, wodurch es zu einer höheren Verdunstung als bei vollversiegelten Flächen kommt. [38] Verdunstung ist ein physikalischer Prozess, bei dem Wasser vom flüssigen in den gasförmigen Zustand übergeht. Die dafür benötigte Energie wird der Umgebung entzogen, was eine Abkühlung der Luft zur Folge hat. Diese sogenannte Verdunstungskälte wirkt sich positiv auf das Stadtklima aus. [12]

Um den Einfluss der Porosität auf die Temperaturentwicklung zu quantifizieren, wurden im Zuge einer Studie [46] in Taipei City Testfelder angelegt. Neben einer Straße in herkömmlicher, dichter Bauweise wurden ein Radweg aus porösem Asphalt und ein Gehweg mit versickerungsfähigem Betonsteinpflaster errichtet. Bei Regen konnte im Vergleich zur Straße ein Temperaturunterschied von 3,9 °C beim offenporigen Asphalt und von sogar 6,6 °C beim Pflaster festgestellt werden. Im trockenen Zustand kam es, wie bereits erläutert, verglichen mit der dichten Bauweise zu einer rascheren

Aufheizung aber auch schnelleren Abkühlung durch ihre geringe Wärmespeicherung. Während einer trockenen Hitzewelle konnte dadurch ein Temperaturunterschied zur Straßenoberflächentemperatur von 17,0 °C beim Asphalt-Radweg bzw. von 14,3 °C beim Pflastergehweg gemessen werden. Diese Ergebnisse sind in Abbildung 4.1 dargestellt und lassen vermuten, dass ein großflächiger Einsatz von porösen Straßenoberflächen helfen könnte, das Phänomen der urbanen Hitzeinseln abzuschwächen. [46]

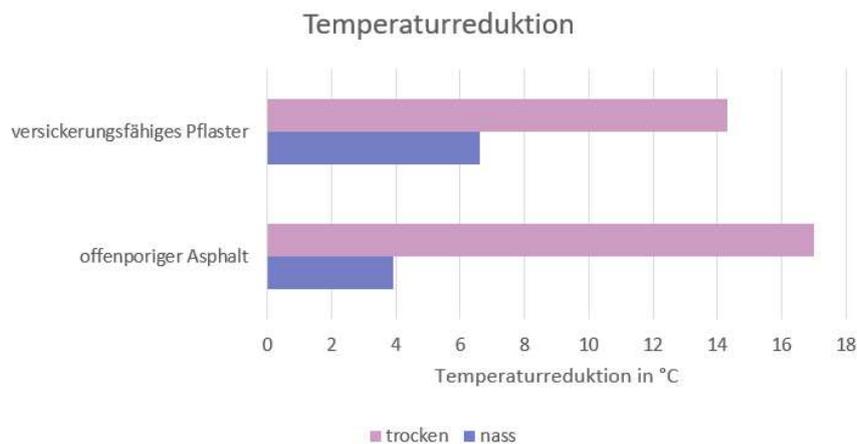


Abbildung 4.1: Reduktion der Oberflächentemperatur verglichen mit herkömmlicher, dichter Bauweise. Eigene Darstellung unter Verwendung von [46]

Mit poröser Oberfläche lassen sich Straßen in Asphalt-, Beton- und Pflasterbauweise herstellen. Sie können nicht nur Effekte auf die sommerliche Überwärmung, sondern auch auf den städtischen Wasserhaushalt und Straßenlärm haben, wie in Kapitel 3 und 5 näher erläutert wird. Die offenporige Oberfläche verringert außerdem die Aqua-Planing-Gefahr bei Regen. Das veränderte Gefüge wirkt sich jedoch nachteilig auf die Belastbarkeit und Dauerhaftigkeit aus. [45]

Im folgenden Unterkapitel wird auf die am häufigsten umgesetzte Form der versickerungsfähigen Pflaster näher eingegangen.

4.2.3 Versickerungsfähige Pflaster

Wasserdurchlässige Pflasterdecken werden vorrangig zur Ableitung und Versickerung von Niederschlagswasser hergestellt, worauf in Kapitel 5 näher eingegangen wird. Durch die höhere Verdunstung weisen sie aber auch einen kühlenden Effekt auf. Die latente Kühlung ist dabei von den verwendeten Pflastersteinen, der Fugengröße und dem Fugenmaterial sowie vom Speichervermögen des Untergrundes abhängig. [47]

Eine neue Form der versickerungsfähigen Pflaster stellen selbstkühlende Betonpflastersteine dar. Diese wurden speziell entwickelt, um den Hitzeinsel-Effekt durch verstärkte Verdunstung entgegenwirken zu können. Sie weisen eine zweilagige Struktur auf – die Oberfläche bildet wasserdurchlässiger Beton, darunter liegt eine Speicherschicht mit angepasster Rezeptur, um möglichst viel Wasser aufnehmen zu können. Dieser können Ton, natürliche Blähstoffe, wie Perlit, Lavastein oder Abfallstoffe, wie Schlacke oder Recyclingbeton, zugefügt werden, die ein hohes Speichervermögen aufweisen. Untersuchungen zeigten, dass die Eigenschaften dieser unteren Schicht den größten Einfluss auf das Abkühlvermögen haben. Bei der Planung müssen auch die erforderlichen mechanischen Eigenschaften, wie die Druckfestigkeit und Frost-Tau-Beständigkeit, berücksichtigt

werden. Da diese meist mit zunehmendem Wasseraufnahmevermögen sinken, muss das Mischgut an die konkrete Einbausituation angepasst werden. [48] Empfehlenswert sind Pflastersteine mit 3 V.-% wasserabsorbierenden Fasern in der oberen wasserführenden Schicht. Die Speicherschicht enthält 33 M.-% Recyclingbeton, wodurch eine gute Tragfähigkeit bei gleichzeitig hoher Wasserspeicherung erzielt wird. Mit diesen Pflastersteinen konnte in einem Feldversuch eine um 8 °C reduzierte Oberflächentemperatur im Vergleich zum zweischichtigen Referenzstein festgestellt werden. [45]

Eine Sonderbauweise stellen begrünte Decken da. Dabei stabilisieren Gitter aus Plastik, Metall oder Beton die Fahrbahnoberfläche. In den Zwischenräumen können Pflanzen, wie Gras, wachsen und Wasser versickern bzw. verdunsten. Das wohl bekannteste Beispiel für diese Befestigungsart sind Rasengittersteine. Diese Bauweise eignet sich vorrangig für Flächen mit niedrigem Verkehrsaufkommen, wie Parkplätzen, da eine häufige Überfahrt die Vegetation zu sehr schädigt und die Decken eine geringe Tragfähigkeit aufweisen. Die Anwendung auf Gehsteigen ist ebenfalls problematisch, da durch die unebene Oberfläche das Unfallrisiko steigt und die Barrierefreiheit eingeschränkt wird. [38] [45]

Abbildung 4.2 gibt einen Überblick über die verschiedenen vorgestellten Oberflächenvarianten und ihr Potential zur Temperaturverringern. Als Referenz dient herkömmlicher Asphalt, wie AC 11 deck.

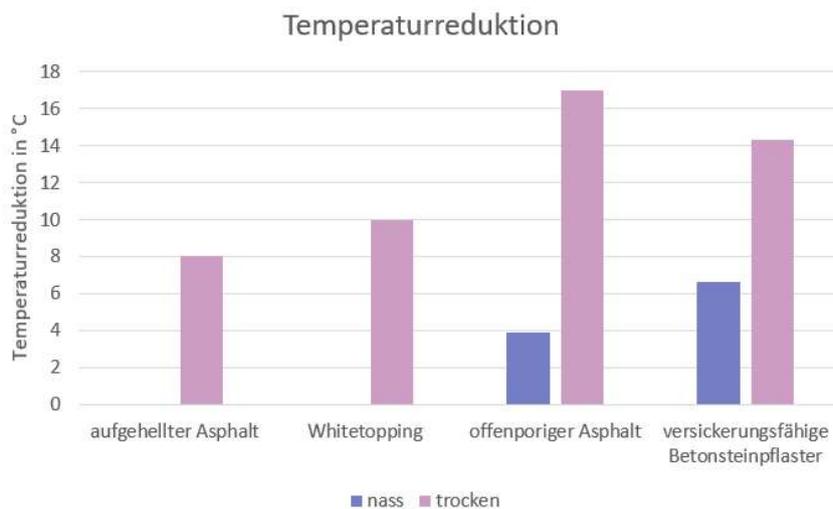


Abbildung 4.2: Reduktion der Oberflächentemperatur verschiedener Straßenbeläge verglichen mit herkömmlichem Asphalt. Eigene Darstellung unter Verwendung von [40], [42], [46]

5 Flächenversiegelung

Um das gesellschaftliche Bedürfnis nach einer funktionierenden Infrastruktur zu stillen, werden immer weitere Straßen, Gebäude und Parkplätze errichtet. Da deren Neubau Platz bedarf, beanspruchen die Menschen mehr und mehr natürlichen Boden für sich. 2021 lag der 3-Jahresmittelwert der Flächeninanspruchnahme in Österreich bei 41 km² - also bei 11,3 ha täglich. Die Verwendung führt dabei zum Verlust der biologischen Funktion des Bodens, wodurch natürlicher Lebensraum und die Möglichkeit zur land- oder forstwirtschaftlichen Nutzung zerstört werden. [49] Ein Teil dieser beanspruchten Flächen wird versiegelt – der Boden wird mit einer wasser- und luftundurchlässigen Schicht, oft Asphalt oder Beton, bedeckt. Diese künstliche Abdichtung hat weitreichende ökologische Folgen – das lokale Klima (vgl. Kapitel 4) und der natürliche Wasserkreislauf werden verändert. Regenwasser kann nicht versickern und muss als Oberflächenabfluss abgeführt werden, wodurch die Grundwasserneubildung reduziert und Hochwasserereignisse verstärkt werden. [50]

Zur ökologischen Bewertung eines Gebietes dient unter anderem der Versiegelungsgrad, der den Anteil der versiegelten Fläche an der Gesamtfläche wiedergibt. Österreichischer Spitzenreiter ist hier Wien, mit einem Anteil von 26,5 %, gefolgt von Linz und Salzburg, mit 25,4 % und 24,3 %. Betrachtet man jedoch die Versiegelung pro Einwohner, führt Linz mit 116 Quadratmetern pro Kopf, gefolgt von Salzburg mit 102 m². Wien weist unter Österreichs Großstädten die höchste Effizienz auf. Hier kommen auf einen Einwohner 55 m² versiegelte Fläche. [51] Ein anderes Bild ergibt sich in ländlichen Regionen – in einzelnen Gemeinden im Burgenland und in Niederösterreich liegt die Flächenversiegelung pro Kopf bei über 500 m². Österreichweit ergab sich so im Jahr 2018 eine versiegelte Fläche pro Kopf von 209 m², wie in Abbildung 5.1 dargestellt. [52]

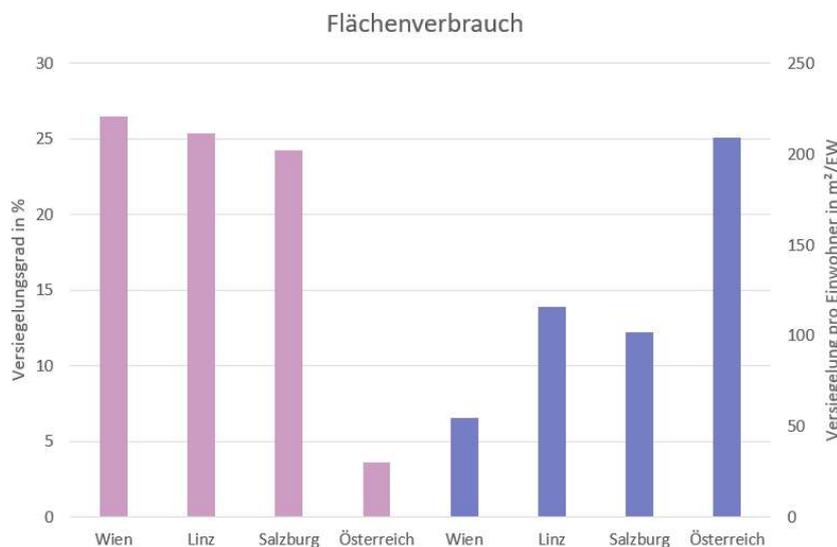


Abbildung 5.1: Versiegelungsgrad und Flächenverbrauch pro Einwohner in Österreichs Großstädten. Eigene Darstellung unter Verwendung von [51], [52]

Der Klimawandel führt nicht nur zu Hitzewellen und Dürren, sondern verstärkt auch Starkregenereignisse. Der Weltklimarat IPCC [53] warnt, dass bei einem globalen Temperaturanstieg von 1,5 °C Starkniederschläge und Überschwemmungen in den meisten Regionen Afrikas, Asiens, Nord Amerikas und Europa intensiver und häufiger auftreten werden. Steigt die Temperatur noch höher wird sich dieses Phänomen weiter verstärken und flächenmäßig ausdehnen. Bei Starkregenereignissen

fallen mehr als 25 mm Regen pro Stunde oder 35 mm in sechs Stunden. Da die Kanalisation und der Boden so große Wassermengen in dieser kurzen Zeit nicht aufnehmen können, kann es zu Überschwemmungen, Sturzfluten, Hangwasser und Erdrutschen kommen. Das Schadensausmaß hängt neben natürlichen Faktoren, wie Topographie, Regenmenge und -dauer, auch von menschengemachten Faktoren, wie dem Versiegelungsgrad, der Bebauungsdichte und der Aufnahmekapazität des Entwässerungssystems ab.

Durch die genannten Folgen rückt die Problematik der Flächenversiegelung immer mehr in den Fokus der Politik – Ziele finden sich in den Raumordnungsgesetzen der Länder, in den Fachplanungen des Bundes und auch im Regierungsprogramm 2020 bis 2024. Hier wird festgeschrieben, dass die Flächeninanspruchnahme bis zum Jahr 2030 auf 2,5 ha pro Tag bzw. 9 km² pro Jahr reduziert werden soll. Europaweit soll der Netto-Neuverbrauch an Fläche bis zum Jahr 2050 vollkommen eingeschränkt werden. [52]

Bei durchlässigen Verkehrsflächen kann Wasser versickern. Dies hat neben dem positiven Effekt auf das Stadtklima durch Verdunstung, wie in Kapitel 4 erläutert, auch eine entlastende Wirkung auf die Kanalisation. Bei voll versiegelten Flächen muss die gesamte Regenmenge als Oberflächenabfluss durch das Entwässerungssystem abgeführt werden. Vor allem bei Starkregenereignissen kann dies die Kanalisation überlasten und zu Überschwemmungen führen. [12] Da das bestehende Kanalsystem nicht so einfach erweitert werden kann, gilt es, andere Wege zum Regenwassermanagement zu finden. Hierzu können beispielsweise Regenrückhaltesysteme zur Verzögerung der Ableitung verwendet werden. Auch versickerungsfähige Verkehrsflächen schaffen hier Abhilfe. [47] Durchlässige Straßenbefestigungen können den Abflussspitzenwert je nach Regendauer und -intensität um 16 % bis 55 % und die abzuleitende Wassermenge um durchschnittlich 37,6 % reduzieren. [46] Durch die Entlastung der Kanalisation und Kläranlagen, verhindern sie so Überschwemmungen, schützen natürliche Gewässer vor ungereinigtem Überschusswasser und erlauben dem Niederschlag zur Grundwasserneubildung beizutragen. [47] Optimal wäre eine Versickerung durch begrünte Flächen, wie Böschungen oder Sickermulden, da der belebte Boden als biologischer Filter dient und so die Schadstoffbelastung des Straßenwassers reduziert. Besonders in Städten fehlt durch die dichte Bebauung hierfür aber meist der Platz. In diesem Fall können versickerungsfähige Verkehrsflächen eine gute Lösung darstellen, wobei Voraussetzungen aus dem Boden- und Gewässerschutz berücksichtigt werden müssen. Daher sollten sie grundsätzlich nur in Bereichen eingesetzt werden, in denen ein geringer Schadstoffeintrag zu erwarten ist. [54]

5.1 Dimensionierung der Oberflächenentwässerung

Das Regelblatt 45 „Oberflächenentwässerung durch Versickerung in den Untergrund“ des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes (ÖWAV) [55] basiert auf der ÖNORM B 2506-1 [56] und enthält wichtige Erkenntnisse zur Dimensionierung von Entwässerungsanlagen. Dabei sind auch bei flächenhafter Versickerung Kenntnisse der ortsspezifischen Randbedingungen erforderlich. Dazu zählen der Bemessungsniederschlag am Standort, die abflusswirksame Fläche sowie die Durchlässigkeit der Oberfläche und des Untergrundes. [55]

Beim Bemessungsniederschlag wird die Jährlichkeit und die Niederschlagsdauer berücksichtigt. Daten dazu werden vom Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft unter <https://ehyd.gv.at> [57] veröffentlicht. Bei der Bemessung sollte mindestens ein fünfjähriges Regenereignis betrachtet werden, wobei bei besonderen Schutzerfordernissen von einer höheren Auftrittswahrscheinlichkeit ausgegangen werden soll. [55] Mit der Bemessungsregenspende in l/(s*ha)

und der Einzugsfläche kann die abzuleitende Wassermenge in l/s berechnet werden. Auf diese müssen die Durchlässigkeit des Oberbaus und Untergrundes abgestimmt werden. Als Maß für diese Sickerfähigkeit können der Infiltrationsbeiwert k_i oder der Durchlässigkeitsbeiwert k_f herangezogen werden, die später noch genauer erläutert werden. [54] Da bei flächenhafter Versickerung kein Speichervermögen besteht, muss die Sickerleistung zumindest der abzuleitenden Regenwassermenge entsprechen. Daraus resultieren Anforderungen an die Größe der Sickerfläche, die vor allem bei der Wahl von Pflasterdeckensystemen berücksichtigt werden müssen. Ansonsten ist eine zusätzliche Entwässerungsanlage erforderlich. [56]

5.2 Durchlässigkeit von Straßen

Bei Regen verdunsten bei nicht bebauten Flächen durchschnittlich 60 % des herabfallenden Wassers, 25 % versickern und tragen zur Grundwasserneubildung bei und nur 15 % fließen oberflächlich ab. Ganz anders sieht die Situation bei versiegelten Flächen aus. [58]

Der Abflussbeiwert ψ gibt das Verhältnis des oberirdisch abfließenden Wassers zum Gesamtniederschlag an – er ist also ein Maß für die abflusswirksame Regenmenge und kann zur Dimensionierung der Entwässerungseinrichtungen einer Fläche herangezogen werden. Je niedriger der Wert, desto größer ist der Anteil an Wasser, der versickert. Je höher der Abflussbeiwert, desto mehr Wasser muss durch das Entwässerungssystem abgeführt werden, um Überschwemmungen zu vermeiden. Bei herkömmlichen dichten Straßendecken aus Beton oder Asphalt liegt der Abflussbeiwert bei etwa 0,9 – es kann nahezu kein Wasser versickern. Für Pflaster mit dichten Fugen ergibt sich ein Wert von 0,75, für solche mit offenen Fugen ein Wert von 0,5. Bei Rasengittersteinen müssen nur noch 15 % des herabfallenden Regenwassers von der Kanalisation aufgenommen werden. [59]

Abbildung 5.2 enthält eine vergleichende Darstellung der durchschnittlichen Abflussbeiwerte verschiedener Oberflächen.

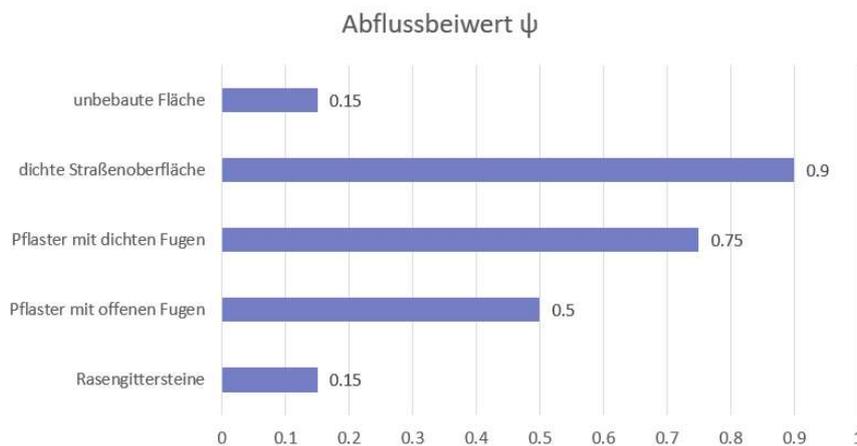


Abbildung 5.2: Abflussbeiwert verschiedener Oberflächen. Eigene Darstellung unter Verwendung von [58], [59]

In weniger dicht besiedelten Gebieten können Mulden-Rigol-Systeme gebaut werden, um die Spitzenabflüsse bei Starkregen aufzunehmen, wofür in Städten aber der Platz fehlt. Hier müssen stattdessen flächige, unterirdische Retentionsbereiche geschaffen werden. [58] Ein Ansatz, der in der Seestadt Aspern großflächig umgesetzt wurde, ist das „Schwammstadt-Prinzip“, das in Kapitel 5.4 näher erläutert wird. Alternativ kann das Wasser direkt über die Verkehrsfläche aufgenommen werden. Diese durchlässigen Straßenaufbauten werden Thema der folgenden Kapitel sein.

Um die Wasserdurchlässigkeit einer Schicht zu quantifizieren, können der Infiltrationsbeiwert k_i oder der Durchlässigkeitsbeiwert k_f herangezogen werden. Der Infiltrationsbeiwert k_i beschreibt die Versickerungsgeschwindigkeit, gibt also in m/s an, wie schnell Wasser senkrecht in einen teilgesättigten Baustoff eindringt. Der Durchlässigkeitsbeiwert k_f wird im Labor an fast vollständig gesättigten Proben ermittelt. Er gibt die Geschwindigkeit in m/s an, mit der Wasser bei einem definierten hydraulischen Gefälle durch einen Probequerschnitt eines Baustoffes oder Bauteils fließt. Die Differenz zwischen den beiden Kenngrößen resultiert aus den unterschiedlichen Sättigungsgraden. Beim teilgesättigten Prüfquerschnitt behindern Luftbläschen im Baustoff die Strömung, weshalb der Infiltrationsbeiwert stets kleiner als der Durchlässigkeitsbeiwert ist, aber die tatsächliche Versickerung an der Straßenoberfläche besser beschreibt. [47] Erfahrungsgemäß liegt der Infiltrationsbeiwert bei etwa 50 % des Durchlässigkeitsbeiwerts, ist aber einer gewissen Streuung unterlegen, die sich aus dem Einbau, dem Material und der Prüfmethode ergibt. [54]

Damit Wasser in den Untergrund versickern kann, müssen nicht nur die Fahrbahndecke, sondern auch alle Schichten des Unterbaus dauerhaft durchlässig sein. Solche Konstruktionen weisen meist eine geringere mechanische Tragfähigkeit als gewöhnliche Straßenaufbauten auf, weshalb sie vorrangig bei Flächen mit geringer Verkehrsbelastung eingesetzt werden. Dazu gehören Gehwege, Fußgängerzonen, Parkplätze und wenig befahrene Straßen, wie Anliegerstraßen. [58] Auch der Untergrund muss ausreichend mächtig und versickerungsfähig sein. Es gilt $k_i \geq 3 \cdot 10^{-5}$ m/s oder $k_f \geq 5 \cdot 10^{-5}$ m/s für alle Schichten unter der Straßenoberfläche. [54] Des Weiteren müssen bei der Errichtung einer solchen Straße ortsabhängige, wasserrechtliche Fragen mit den zuständigen Behörden geklärt werden. Diese betreffen beispielsweise die eventuell erforderliche Reinigung des Wassers oder die Nähe zu Wasserschutzgebieten. Straßenwasser kann durch Reifenabrieb, Tropfverluste, Feinstaub oder Tausalz belastet sein. [47] Dadurch werden Stickoxide, Schwermetalle, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe und andere problematische Stoffe eingetragen. [60] Diese sind oft an feine Partikel gebunden, die beim Durchsickern des Straßenaufbaus teilweise abgefiltert werden. So wird das Straßenwasser physikalisch gereinigt – es fehlt jedoch ein biologischer Schadstoffabbau durch Mikroorganismen im Boden. Aus diesem Grund sind alle potenziell schädlichen Verschmutzungen zu vermeiden, woraus sich auch spezielle Anforderungen an den Winterdienst ergeben. [47]

Neben der erforderlichen Versickerungsfähigkeit ist beim Straßenaufbau ein besonderes Augenmerk auf die Filterstabilität der Schichten zueinander zu legen. Verfügt eine Schicht über eine ausreichende Filterstabilität gegenüber einer benachbarten Schicht, heißt das, dass sie dauerhaft als Filter wirkt – auch bei strömendem Wasser kommt es zu keiner Erosion, also einer Ausspülung des Stützkorns, und keiner Kolmation. Dies bedeutet, dass auch beim Fließen in eine Schicht mit höherer Wasserdurchlässigkeit der schädliche, verstopfende Eintrag von Fein- und Stützkorn in die Poren verhindert wird. Ist dies, vor allem bei ungebundenen Schichten, nicht gegeben, können Geotextilien als Zwischenlage eingebaut werden. Häufig werde solche bei Pflasterdecken unter der Bettung eingesetzt, wobei auf eine ausreichende Robustheit bei dennoch möglichst hoher Durchlässigkeit geachtet werden sollte. [54]

Durch Verschmutzung nimmt die Durchlässigkeit von versickerungsfähigen Verkehrsflächen im Laufe der Zeit ab. Erfahrungsgemäß liegt der Abflussbeiwert nach ein paar Jahren Liegezeit bei 0,3 bis 0,5. Aus diesem Grund muss zusätzliche eine geeignete Oberflächenentwässerung geplant werden, wobei Versickerungsanlagen bevorzugt werden sollten. Um den Anteil des oberflächlich abfließenden Wassers möglichst gering zu halten, kann die Neigung bei Nebenflächen von den allgemein

empfohlenen 2,5 % auf minimal 1 % abgemindert werden. Neigungen über 5 % sollten generell vermieden werden. [54]

5.3 Anwendung versickerungsfähiger Bauweisen

Bevor im Folgenden die verschiedenen möglichen Deckschichtarten erläutert werden, werden hier kurz die allgemeinen Anforderungen an den Oberbau und den Untergrund sowie planerische Rahmenbedingungen beschrieben. Beim konventionellen Straßenbau mit dichter Decke soll durch bauliche Maßnahmen verhindert werden, dass Wasser in den Straßenaufbau eindringt. Bei versickerungsfähigen Straßen ist genau dieser Wassereintritt das Ziel. Dabei ist ein unbehinderter, rascher Abfluss an jeder Stelle des Querschnitts und im Untergrund wichtig, um Wasserüberschuss in der Frosteinwirkungstiefe und im Einflussbereich der Verkehrsbelastung zu vermeiden. [47]

Grundsätzlich sollen mindestens 2 m Flurabstand zum Grundwasser und mindestens 1 m natürlich gewachsener Boden unterhalb des Oberbaus gegeben sein. Sind diese Randbedingungen nicht gegeben, ist die Zulässigkeit der Errichtung mit der zuständigen Behörde zu klären. [61]

Dem Untergrund kommen verschiedene Aufgaben zu. Einerseits muss er, wie beim konventionellen Straßenbau, die verkehrsbedingten Spannungen ohne bleibende Verformung aufnehmen, woraus Anforderungen an den Verformungsmodul und den Verdichtungsgrad resultieren. Andererseits muss er das im Oberbau versickerte Wasser aufnehmen und rasch abfließen lassen. Es eignet sich daher nicht jeder Boden als Untergrund für eine versickerungsfähige Straße. Gut geeignet sind grobkörnige Böden, bedingt geeignet sind gemischtkörnige Böden mit geringem Feinanteil. Feinkörnige Böden oder gemischtkörnige Böden mit hohem Feinanteil sind aufgrund ihrer geringen Wasserdurchlässigkeit und hohen Frostempfindlichkeit eher ungeeignet. [47]

Die Aufgaben des Untergrundes fallen auch dem Oberbau zu. Die Tragschichten dienen zur schadlosen Ableitung der verkehrsinduzierten Spannungen. Je nach Frostempfindlichkeit des Untergrundes müssen auch Frostschutzschichten angeordnet werden, um Frostschäden über die gesamte Lebensdauer der Straße zu vermeiden. Zusätzlich müssen alle Schichten des Straßenaufbaus über eine ausreichende Wasserdurchlässigkeit verfügen, um die Versickerung des Niederschlagswassers zu ermöglichen. Als Tragschichten eignen sich daher gebundene Tragschichten, wie wasserdurchlässige Asphalt- oder Dränbetontragschichten, oder solche ohne Bindemittel. [47] Dafür sind möglichst grobkörnige Gemische mit einem Größtkorn von 32 mm, 45 mm oder 63 mm zu wählen. Um eine ausreichende Durchlässigkeit zu gewährleisten, ist auf einen geringen Feinanteil und eine Sieblinie im unteren bis mittleren zulässigen Bereich zu achten. [54] Des Weiteren sind bei der Auswahl und Dimensionierung die Rahmenbedingungen aus Frost und Verkehrsbelastung zu berücksichtigen, wobei ein besonderer Fokus auf die Filterstabilität zu legen ist. [47] Zur Dimensionierung des Oberbaus sollte RVS 03.08.63 [62] herangezogen werden. Bei Einbau sollte mit besonderer Vorsicht verdichtet werden. Die Anforderungen an den Verdichtungsgrad und die Verformungsmoduli sind unbedingt einzuhalten. Eine Überverdichtung und eine übermäßige Kornzertrümmerung sind aber unbedingt zu vermeiden. [54]

Das ÖWAV-Regelblatt 45 „Oberflächenentwässerung durch Versickerung in den Untergrund“ [55] unterscheidet fünf Kategorien von Herkunftsflächen des Niederschlagswassers, in die hier relevante Verkehrsflächen wie folgt eingeteilt werden können:

- F1: Geh- und Radwege, nicht befahrene Vorflächen und Zufahrten für Einsatzfahrzeuge

- F2: Parkflächen für Pkw mit weniger als 20 Stellplätzen bzw. 400 m² (Zufahrt und Abstellfläche); Parkflächen für Pkw mit weniger als 75 Stellplätzen bzw. weniger als 2.000 m² mit nicht häufigem Fahrzeugwechsel (Wohnanlagen, Mitarbeiterparkplätze, Park-and-Ride-Anlagen, ...), Fahrflächen mit einer JDTV bis 500 Kfz/24 h
- F3: Parkflächen für Pkw mit weniger als 75 Stellplätzen bzw. 2000 m² mit häufigem Fahrzeugwechsel (Kundenparkplätze, ...), Parkflächen für Pkw mit weniger als 1000 Stellplätzen, Fahrflächen mit einer JDTV von 500 bis 15.000 Kfz/24 h, Parkflächen für LKW, sofern wesentliche fahrzeugbedingte Verschmutzung des Niederschlagwassers mit hoher Sicherheit ausgeschlossen werden kann
- F4: Parkflächen für Pkw mit mehr als 1.000 Stellplätzen, betriebliche Fahrflächen mit einer JDTV über 15000 Kfz/24 h, betriebliche Flächen mit starker Verschmutzung (beispielsweise durch Landwirtschaft)
- F5: Parkflächen, sofern wesentliche fahrzeugbedingte Verschmutzung des Niederschlagwassers nicht mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden kann, sonstige stark verschmutzte Flächen

JDTV steht dabei für jahresdurchschnittlicher täglicher Verkehr. Die verschiedenen Kategorien weisen ein unterschiedliches Grundwasserverschmutzungspotential auf und ziehen unterschiedliche Behördenverfahren nach sich. Beispielsweise stellt der Flächentyp F1 in der Regel keine Gefahr für das Grundwasser dar und ist deshalb bewilligungsfrei. Soll Wasser von Flächen des Typs F3 ab 1.000 m² und Flächen des Typs F4 sowie F5 versickert werden, besteht auf jeden Fall eine wasserrechtliche Bewilligungspflicht. Hier besteht die Gefahr des Eintrags von Kohlenwasserstoffen durch Tropfverluste, Schwermetallen, wie Blei, Nickel oder Cadmium, Reifen- und Bremsabrieb sowie Chlorid als Tausalz. Eventuell muss das Niederschlagswasser daher vor der Versickerung vorgereinigt werden. [63]

Laut ÖWAV-Regelblatt 45 [55] dürfen bei der Kategorie F1 Flächen mit mineralischem Filter, wie Pflaster mit Sickerfugen oder poröse Deckschichten, zur Versickerung herangezogen werden. Beim Typ F2 ist eine Versickerung über wasserdurchlässige, befestigte Flächen mit Oberbodenschicht, wie Rasengittersteine ≥ 8 cm, zulässig. Für Pkw-Parkplätze der Kategorie F3 dürfen Rasengittersteine ≥ 30 cm gefüllt mit Bodenfiltermaterial geplant werden. Bei nur temporärer Nutzung von Pkw-Parkplätzen des Typs F2 und F3, wie es bei Badeteichen oder Festivals der Fall ist, sind die Ausführungsmöglichkeiten individuell zu beurteilen.

5.3.1 Wasserdurchlässige Asphaltdeckschichten

Wasserdurchlässiger Asphalt wird auch als Dränasphalt bezeichnet. Er kann ein- oder zweischichtig errichtet werden. Zu den Vorteilen der zweischichtigen Bauweise zählen eine bessere Ebenheit, eine feinere Oberflächentextur und eine längere funktionelle Lebensdauer. Der genaue Aufbau, die Schichtdicken und Mischgutsorten sind von der Art der Verkehrsfläche und der Belastung abhängig. Bei der Auswahl der Gesteinskörnung ist die Affinität zwischen Bindemittel und Korn durch den Wasserzutritt besonders wichtig. Während in wasserdurchlässigen Asphalttragschichten als Bindemittel sowohl herkömmliches Bitumen als auch Polymermodifiziertes Bitumen verwendet werden kann, sollte bei versickerungsfähigen Asphaltdeckschichten immer auf Polymermodifiziertes Bitumen zurückgegriffen werden. Besonders geeignet ist die Sorte PmB 25/55-55 A, da ein hoher Widerstand gegen Schubbeanspruchung sowie eine erhöhte Dauerhaftigkeit erzielt werden können. Der Mindest-Bindemittelgehalt ist abhängig von der Rohdichte der verwendeten Gesteinskörnung. Die

Körnung beeinflusst des Weiteren das Einbau- und Verdichtungsverhalten sowie den Hohlraumgehalt der fertigen Schicht, der für die Versickerungsfähigkeit maßgebend ist. [54]

Um die gewünschten Eigenschaften gewährleisten zu können, ist beim Errichten der Verkehrsfläche auf besonderer Randbedingungen zu achten. Der bei Temperaturen zwischen 140 °C und 160 °C hergestellte Asphalt sollte rasch eingebaut werden, wobei beim Transport sehr wichtig ist, dass das Mischgut nicht zu sehr abkühlt. Die Bauarbeiten sollten nicht unter 10 °C, bei Regen oder starkem Wind stattfinden. Dränasphalt reagiert auf Imperfektionen deutlich stärker als herkömmlicher Asphalt, weshalb der maschinelle Einbau möglichst rasch und fehlerfrei passieren soll. Ein besonderer Fokus ist auch auf die Verdichtung zu legen, da diese die Dauerhaftigkeit maßgebend beeinflusst. Der Verdichtungsgrad sollte bei mindestens 97 % liegen. Dennoch müssen, um die Wasserdurchlässigkeit zu garantieren, gewisse Mindesthohlraumgehalte eingehalten werden. [54]

Bei Dränasphalt ergeben sich besondere Anforderungen an den Betrieb. Die Wasserdurchlässigkeit wird durch den Eintrag von Feinanteilen in das Porensystem sowie oberflächlichen Verschmutzungen mit der Zeit reduziert, weshalb wasserdurchlässiger Asphalt deutlich häufiger als herkömmlicher Straßenbelag gereinigt werden muss. Die Reinigungsintervalle sind nach der Nutzung und den örtlichen Gegebenheiten zu wählen. Schneeräumung sollte mit Hilfe von Schneefräsen oder Kehrbesen passieren, da das Räumen mit Schild ein hohes Beschädigungspotenzial aufweist. Auf abgestumpfte Streustoffe sollte bei offenporigen Straßendecken gänzlich verzichtet werden, da diese dazu neigen, das Porensystem zu verstopfen. Aus Gründen des Grundwasser- und Umweltschutzes ist auf Auftaumittel zu verzichten. Vor allem im Winter kann es daher zu Nutzungseinschränkungen kommen. [54]

Besondere Vorsicht ist auch bei Aufgrabungen und Instandsetzungen gefordert. Die Arbeiten sind von qualifiziertem Personal genau zu überwachen, um zu garantieren, dass die Durchlässigkeit, Tragfähigkeit und Filterstabilität der betroffenen Fläche und benachbarter Bereiche wiederhergestellt bzw. nicht beeinträchtigt wird. [54]

5.3.2 Wasserdurchlässige Betondeckschichten

Wasserdurchlässiger Beton ähnelt der lärmindernden, offenporigen Betondeckschicht, die schon in Kapitel 3.5.4 beschrieben wurde. Wichtig ist ein großer Hohlraumgehalt mit verbundenen Poren, damit Wasser abfließen kann. Der sogenannte Dränbeton wird in der Regel in einschichtiger Bauweise hergestellt, wobei dem haufwerksporigen Gefüge zum Teil Polymer zugesetzt wird. Der genaue Aufbau ist abhängig von der Flächennutzung und der Belastung zu wählen, da der Beton aufgrund der porösen Struktur eine geringere Tragfähigkeit als herkömmlicher Straßenbaubeton aufweist. Auch bei wenig belasteten Flächen ist eine Mindestdicke der Dränbetondecke von 10 cm einzuhalten. Mit steigender Belastung steigen auch die Schichtdicken – abhängig von Lastklasse, etwaigem Polymerzusatz und Biegezugfestigkeit der Dränbetondeckschicht. Unter der Betondecke können eine Tragschicht ohne Bindemittel oder eine Dränbetontragschicht mit darunterliegender Frostschutzschicht angeordnet werden. [54]

Bei der Auswahl der Gesteinskörnung empfiehlt sich eine Sieblinie mit Ausfallkörnung, um einen Mindesthohlraumgehalt von 15 Vol.-% und die gewünschte Wasserdurchlässigkeit von $k_f \geq 5 \cdot 10^{-5}$ m/s erreichen zu können. Zur Verbesserung der Frisch- und Festbetoneigenschaften sowie der Dauerhaftigkeit können Zusatzmittel, wie Betonverflüssiger, und Zusatzstoffe, beispielsweise Polymere, zugefügt werden. Aufgrund des niedrigen Wasser-Bindemittelwerts von maximal 0,4 weisen Dränbetondeck- und -tragschichten meist einen ausreichenden Frostwiderstand auf. Der Frost-

Tausalz-Widerstand kann durch die Beimengung eines geeigneten Polymers verbessert werden. Hierfür eignen sich beispielsweise Kunststoffdispersionen. Eine Polymerzugabe erhöht auch die Biegezugfestigkeit, die bei mindestens 3,0 MPa liegen muss. Eine gute Griffigkeit der fertigen Dränbetondecke kann durch die Beimengung einer Gesteinskörnung mit hohem Polierwiderstand erreicht werden. [54]

Die Errichtung von Dränbetondeck- und -tragschichten kann bei Temperaturen zwischen 5 °C und 25 °C erfolgen. Während und nach dem Einbau ist der Dränbeton vor Niederschlag zu schützen. Des Weiteren ist ein besonderer Fokus auf die Nachbehandlung zu legen, um zu schnelles Austrocknen zu vermeiden. Der Beton sollte drei Tage lang feucht gehalten werden – eine Abdeckung mit Folien oder angefeuchtetem Vliesstoff ist zweckmäßig. [54]

Im Vergleich zu herkömmlichen, dichten Straßendecken ergeben sich besondere Anforderungen an den Betrieb. Diese gleichen für Dränbeton den bereits für Dränasphalt beschriebenen und umfassen die Reinigung, den Winterdienst sowie Instandsetzungs- und Aufgrabungsarbeiten. [54]

5.3.3 Versickerungsfähige Pflasterdecken

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, eine versickerungsfähige Pflasterdecke herzustellen. Einerseits können Sickerfugen bzw. aufgeweitete Sickerfugen sowie zusätzliche Sickeröffnungen für die Wasserdurchleitung herangezogen werden, wofür sie mit einem geeigneten, wasserdurchlässigen Fugenmaterial verfüllt werden müssen. Bei dieser Variante kommen gefügedichte Pflastersteine zur Anwendung. Andererseits kann die Versickerung über haufwerksporige Pflastersteine passieren. Auch eine Kombination ist möglich. [47]

In jedem Fall muss das Bettungsmaterial eine geeignete Sieblinie und eine ausreichende Festigkeit aufweisen. Dasselbe Korngemisch sollte auch zur Füllung der Fugen verwendet werden, wobei die Korngröße auf die geplante Fugenbreite abzustimmen ist. Sind vom Hersteller produktspezifische Fugenbreiten angegeben, sind diese einzuhalten. Werden verschiedene Körnungen verwendet, ist auf eine ausreichende Filterstabilität zwischen Fugen und Bettung zu achten. Erfolgt die Versickerung nur über Sickerfugen und -öffnungen, ist ein besonderer Fokus auf eine hohe Durchlässigkeit des Füllmaterials im verdichteten Zustand zu legen, da der versickerungsfähige Anteil an der Gesamtfläche in diesem Fall gering ist. [47] Dabei besteht laut dem „Merkblatt für Versickerungsfähige Verkehrsflächen“ [54] des FGSV folgender Zusammenhang:

$$k_f = \frac{5 * 10^{-5} * 100}{\text{Anteil Fugen und Sickeröffnungen in Prozent}} \quad (1)$$

Haufwerksporige Pflastersteine sind aufgrund ihrer speziellen Herstellung wasserdurchlässig. Bei der Erzeugung dieser Betonsteine greift man auf eine spezielle Sieblinie, die eine Ausfallkörnung aufweist, zurück. So entsteht ein Gefüge, das große miteinander verbundene Poren enthält, durch die das Niederschlagswasser fließen kann. [47] Sie können ein- oder zweischichtig hergestellt werden, wobei die zweischichtige Bauweise an der Oberfläche ein feineres Gefüge als in unteren Bereich aufweist. Trotz ihres lockeren Gefüges müssen sie den Anforderungen an die Druckfestigkeit und an die Beständigkeit gegen Frost genügen. [64] Das verwendete Fugenmaterial ist im Hinblick auf die Optik und die Wasserdurchlässigkeit auf die Struktur der Steine abzustimmen, wobei etwaige Herstellerangaben zu berücksichtigen sind. Erfahrungsgemäß eignet sich die Korngruppe 1/3 besonders gut. Bei der Berechnung der erforderlichen Durchlässigkeit der Fugen entsprechend Formel (1) darf die Wasserdurchlässigkeit der Pflastersteine zusätzlich berücksichtigt werden. [54]

Laut ÖWAV-Regelblatt 45 [55] dürfen durchlässige Pflasterdecken bei den folgenden Flächentypen eingesetzt werden:

- Flächen der Kategorie F1 und Zufahrten zu Einfamilienhäusern erfordern nur einen mineralischen Filter – Pflaster mit durchlässigen Fugen sind also zulässig
- Bei Flächen der Kategorie F2 ist die Versickerung über eine durchlässige, befestigte Fläche mit Oberbodenschicht erlaubt, es dürfen also beispielsweise Rasengittersteine ≥ 8 cm verlegt werden.
- Auf Pkw-Parkplätzen der Kategorie F3 sind Rasengittersteine ≥ 30 cm mit einer Füllung aus Bodenfiltermaterial erlaubt.
- Bei nur temporärer Nutzung von Pkw-Parkplätzen der Kategorie F2 und F3 darf individuell beurteilt werden, welche Variante der flächenhaften Versickerung die Rahmenbedingungen zulassen.

Der Aufbau ist zudem auch abhängig von der Beanspruchung zu wählen. Je nach Lastklasse sind unterschiedliche Nenndicken der Pflastersteine sowie Verband- und Verbundkonstruktionen sinnvoll. Bei aufgeweiteten Sickerfugen ist auf eine ausreichende Horizontalkraftübertragung zu achten. [54]

Bei versickerungsfähigen Pflasterdecken ergeben sich im Betrieb spezielle Anforderungen. Bestimmungen dazu sind in der ÖNORM B 2506-1 [56] sowie in der „Richtlinie für hydroaktive Pflaster- und Plattenflächen“ [61] des FQP zu finden. Besonders wichtig sind regelmäßige Kontrollen und Wartungsarbeiten. Diese sollten saisonal oder nach Ereignissen wie Starkregen und Hochwasser erfolgen. Beim Instandhalten der Oberfläche ist der Fokus auf die Fugenpflege zu legen. Etwaiger Bewuchs oder Schlammablagerungen müssen entfernt und die Fugenfüllung geprüft werden. Auch die Pflasterbeläge müssen regelmäßig gereinigt werden, um die Durchlässigkeit zu erhalten, was maschinell oder händisch erfolgen kann. Besonders in den ersten drei Jahren ist eine manuelle Reinigung zum Schutz der Fugen zu empfehlen. [61] Danach können Wasser unter Hochdruck und Sauger verwendet werden – bei Sickerfugen eignen sich horizontal saugende Kehr- und Saugmaschinen gut, die beides vereinen und die Fugenfüllung schonen. Zur Reinigung von haufwerksporigen Steinen empfehlen sich Hochdruck-Vakuum-Reinigungsgeräte. Nach der Reinigung muss unabhängig vom Verfahren entferntes Fugenmaterial durch neues ersetzt werden. Bei geringer Versickerungsleistung kann es auch sinnvoll sein, das gesamte Fugenmaterial zu tauschen. [47]

Im Rahmen des Winterdienstes sollte auf das Ausbringen von Streusalz verzichtet werden. Stattdessen können abstumpfende Streumittel verwendet werden, wobei auf die Korngröße zu achten ist. Sind diese zu feinkörnig, können sie die Poren und Fugen verstopfen und die Durchlässigkeit verringern. Eine Schneeräumung mittels Kehrbesen oder Schneefräsen wird empfohlen, da die Räumung mit Schild die Pflasterdecke beschädigen kann. [47]

Bei Aufgrabungs- und Instandsetzungsarbeiten ist ein besonderer Fokus auf den Erhalt bzw. die Wiederherstellung der Versickerungsfähigkeit und der Tragfähigkeit zu legen. Die Verkehrsfläche darf während der Arbeiten weder durch Bauverkehr, Aushubarbeiten noch durch Materiallagerung verschmutzt werden. Die für versickerungsfähige Pflasterdecken geforderten Eigenschaften, wie Filterstabilität, Tragfähigkeit und Durchlässigkeit, müssen nach den Arbeiten wiederhergestellt werden. [47]

5.3.4 Erfahrungen zur Dauerhaftigkeit versickerungsfähiger Verkehrsflächen

Wie bereits erläutert nimmt die Durchlässigkeit versickerungsfähiger Beläge im Laufe der Liegezeit durch Verschmutzung ab. Diese Verunreinigungen können beispielsweise durch Bauarbeiten, Landwirtschaft oder Laubabfall verursacht werden. Der resultierende Eintrag von organischen und mineralischen Feinstoffen führt dann zu einer Verstopfung des wasserführenden Porensystems. [47] Des Weiteren reagieren versickerungsfähige Deckschichten im Vergleich zu herkömmlichen Bauweisen sehr empfindlich auf Torsions- und Schubbeanspruchungen, welche bei Überfahrt und Drehbewegungen der Reifen zum Lenken unvermeidlich sind. Ihre Größe kann zwar durch Anpassung der Nutzung, beispielsweise durch die Anordnung schräger Parkplätze, reduziert werden, dennoch weisen durchlässige Bauweisen häufig eine kürzere Lebensdauer als konventionelle Befestigungen auf. [54]

Eine Studie aus den USA untersuchte aus diesen Gründen den Zustand sowie den Verlauf der Durchlässigkeit versickerungsfähiger Beläge über eine Liegedauer von vier Jahren. Dafür wurden bei einem Mitarbeiterparkplatz drei Bereiche gewählt, die jeweils mit einer anderen Bauweise befestigt wurden – Anwendung fanden durchlässiger Asphalt, wasserdurchlässiger Beton sowie eine versickerungsfähige Pflasterdecke. Zur Messung der Durchlässigkeit wurde die ASTM C1701-Methode verwendet, die der Messung mit einem Doppelring-Infiltrometer ähnelt. In den ersten zwei Jahren wurden pro Testfläche vier Versuche an willkürlich gewählten Stellen durchgeführt. Im dritten und vierten Jahr wurden die Fahrflächen und Stellplätze gesondert untersucht und die Tests vier- bis fünfmal wiederholt. [65]

Nach einem Jahr wies der durchlässige Asphalt noch einen relativ guten Zustand auf. Im Laufe der weiteren Liegezeit kam es aber vor allem auf den Fahrflächen zu immer mehr Ausbrüchen, die durch den Verkehr und die Schneeräumung verschlimmert wurden. Bei der Dränbetonfläche kam es mit den Jahren auf den Fahrbahnen zu Ausbrüchen sowie einigen Rissen. Die Stellplätze waren in deutlich besserem Zustand. Die versickerungsfähige Pflasterdecke wies bei der Zustandserfassung nach einem Jahr Liegedauer den schlechtesten Zustand von allen Belägen auf. Es konnten an mehreren Stellen Abplatzungen an Pflastersteinen, fehlendes Fugenmaterial und Vegetationsbewuchs der Fugen festgestellt werden. Letzterer wurde aus Wartungszwecken entfernt. In den folgenden Jahren verschlechterte sich der Zustand weiter, jedoch weniger drastisch als im ersten Jahr. Die Studie reiht daher die Beläge nach Zustand wie folgt: Dränbeton > versickerungsfähige Pflasterdecke > Dränasphalt, wobei die Betondecke den besten und die Asphaltdecke den schlechtesten Platz einnimmt. Die Autoren weisen jedoch darauf hin, dass die Dränasphaltfläche in diesem Versuch der höchsten Verkehrsbelastung ausgesetzt war, was die starke Abnutzung erklären könnte. [65]

Neben dem Zustand wurde die Abnahme der Durchlässigkeit über die Jahre gemessen. Im Neuzustand wies der durchlässige Beton mit 38,2 mm/s die höchste und die versickerungsfähige Pflasterdecke mit 25,4 mm/s die niedrigste Infiltrationsrate auf. Innerhalb des ersten Jahres veränderte sich die Versickerungsfähigkeit der Pflaster- und Asphaltdecke kaum, die der Betondecke nahm jedoch deutlich auf 32,5 mm/s ab. Ähnliches passierte bei der Pflasterdecke im dritten Jahr – die Infiltrationsrate sank innerhalb eines Jahres von 24,1 mm/s auf 7,1 mm/s. Im vierten Jahr kam es bei allen Flächen zu einer deutlichen Abnahme der Durchlässigkeit, wie in Abbildung 5.3 dargestellt ist. War der Zustand der Fahrflächen stets schlechter als jener der Parkplätze, konnte für die Versickerungsfähigkeit anfangs kein Unterschied festgestellt werden. Dies änderte sich nach zwei Jahren und am Ende des Untersuchungszeitraums wiesen die Fahrstreifen eine um etwa 50 % geringere Infiltrationsrate als die Stellplätze auf. Die Ursache dafür ist wohl die hohe Schubbeanspruchung bei Fahrzeugüberfahrt.

Dadurch wird die Oberfläche beschädigt, wodurch mehr Feinstoffe entstehen, die die Poren verstopfen können. Die Abnahme der Infiltrationsraten nach vier Jahren lag daher für Parkflächen bei 60 % bis 79 %, bei den Fahrbahnen aber sogar bei bis zu 90 %. Es ist hinzuzufügen, dass diese Verschlechterung zwar sehr drastisch klingt, das verbleibende Versickerungsvermögen jedoch auf allen Flächen noch ausreicht, um den dortigen fünfjährigen Bemessungsniederschlag mit einer Dauer von einer Stunde aufzunehmen. Aus diesem Grund schlussfolgern die Autoren, dass versickerungsfähige Verkehrsflächen ein wirksames Tool beim Regenwassermanagement und sehr hilfreich bei Starkregenereignissen sein können. [65]

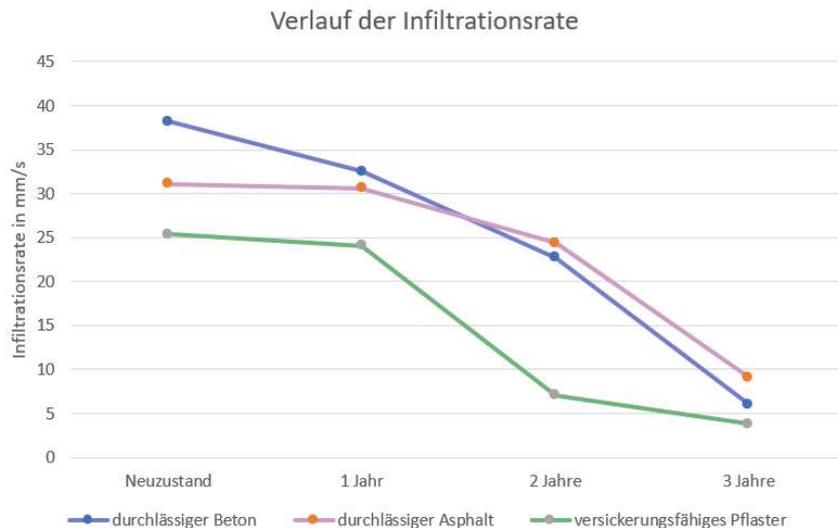


Abbildung 5.3: Veränderung der Infiltrationsrate verschiedener Oberflächen. Eigene Darstellung unter Verwendung von [65]

2022 wurde eine weitere Studie [66] zum Thema der Dauerhaftigkeit versickerungsfähiger Verkehrsflächen veröffentlicht. Ihr Ziel war es, durch Interviews die Praxiserfahrungen von insgesamt 24 dänischen Straßenbesitzer*innen, Bauunternehmer*innen und Berater*innen zusammenzufassen, um daraus Lehren für die weitere Verbesserung dieser Bauweise zu ziehen. Behandelt wurden unter anderem die Themen Versickerung, Verstopfung, Wartung und Kosten für die Instandhaltung. Die erste wasserdurchlässige Fläche mit Asphaltdeckschicht wurde in Dänemark 2013 gebaut, wobei seitdem viele weitere Straßen mit geringer Verkehrsbelastung in gleicher Bauart ausgeführt wurden. Da die Interviews von Dezember 2021 bis März 2022 geführt wurden, konnte auf fast zehn Jahre Erfahrung zurückgeblickt werden. Unglücklicherweise waren nahezu alle Befragten unzufrieden mit der gewählten versickerungsfähigen Bauweise. Die am häufigsten genannte Probleme waren das rasche Verstopfen der Poren durch Verschmutzung und der schlechte Zustand der Oberfläche nach nur wenigen Jahren Liegezeit. Kritisiert wurde auch, dass poröser Asphalt durch die geringere Tragfähigkeit nur in wenigen Bereichen sinnvoll eingesetzt werden kann. Die Interviewten vermuteten außerdem eine unnötige Umweltbelastung, vor allem im Hinblick auf die CO₂-Emissionen, da die Deckschicht durch ihre geringe Dauerhaftigkeit häufig erneuert werden muss. Des Weiteren merkten die dänischen Befragten an, dass sie offizielle Richtlinien mit Materialangaben und Hinweisen zur Ausführung missen. Ein positives Bild ergab sich aber beim Thema Regenwassermanagement. Die Mehrheit der Befragten war sich einig, dass die Kombination von Transportweg und Entwässerungssystem sehr praktisch ist. Vor allem in erst zu erschließenden Gebieten, wo sowohl die Straße als auch das Kanalsystem neu errichtet werden müssen, können versickerungsfähige

Verkehrsflächen einen ökologischen und monetären Vorteil bieten. Darüber hinaus kann es günstiger sein, herkömmliche Straßenaufbauten durch versickerungsfähige zu ersetzen, um Starkregen aufzunehmen, als das bestehende, überforderte Kanalsystem zu erweitern. [66]

Die Studie untersuchte außerdem den Verlauf der Versickerungsfähigkeit über die Liegedauer und welchen Einfluss verschiedene Reinigungsmethoden darauf haben. Dafür wurde jährlich je ein Fahrstreifen der Straßen mittels Unterdruck und ein zweiter mittels Kehrmaschine gereinigt. Es zeigte sich, dass das Infiltrationsvermögen mit der Zeit zwar deutlich abnimmt, durch den hohen Anfangswert aber auch nach mehreren Jahren Liegezeit noch ausreicht, um die Regenmenge eines Wolkenbruchs aufzunehmen. Welche Reinigungsmethode verwendet wird, macht dabei in den ersten Jahren keinen nennenswerten Unterschied. [66]

Die Autor*innen der Studien schließen aus den Interviews, dass versickerungsfähige Verkehrsflächen bei Betrachtung von ökonomischen und ökologischen Aspekten nicht die effizienteste Lösung sind. Als Ursache dafür nennen sie den hohen Wartungsaufwand und die geringe Lebensdauer von nur sechs bis sieben Jahren. Um die in der Vergangenheit aufgetretenen Probleme zu vermeiden, fordern sie bessere und konkretere Informationen sowie Anforderungen von offizieller Seite. [66]

5.4 Schwammstadt-Prinzip

Als Alternative zur flächigen Versickerung durch die Straßenbefestigung gewinnt das Schwammstadt-Prinzip in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung. Es gilt als effektive Maßnahme zur städtischen Klimawandelanpassung, da es mehrere aktuell bedeutsame Umweltziele umsetzt. [67]

Ein wichtiges Ziel der Schwammstadt ist es, das urbane Regenwassermanagement näher an den natürlichen Wasserkreislauf zu rücken. Wichtige Aspekte sind dabei die Wasserrückhaltung, Versickerung und die Verdunstung, wodurch die Kanalisation entlastet und Überflutungen abgeschwächt oder verhindert werden können. Um diesen naturnahen, dezentralen Umgang mit Regenwasser in dicht verbauten Gebieten möglich zu machen, werden Baumscheiben, Einlaufschächte oder Drainagen errichtet, die dem Regenwasser erlauben, in eine Schotterschicht unter dem Straßeneroberbau, die den „Schwamm“ der Schwammstadt darstellt, einzufließen. [67] Sie besteht aus grobkörnigem Gestein, dem sogenannten Grobschlag, der das Gerüst zur Lastabtragung bildet. In die Hohlräume dieser groben Struktur wird Feinsubstrat eingeschlämmt. Es setzt sich aus organischen und mineralischen Feinteilen zusammen und weist wasserbindende Eigenschaften auf. Einfließendes Regenwasser kann so einerseits versickern, was zur Grundwasserneubildung beiträgt und die Kanalisation entlastet, andererseits wird ein Teil davon gespeichert. Dieser Anteil kann genutzt werden, um Stadtbäume zu versorgen, die in der Schotterschicht wurzeln. [68] Bäume sind in urbanen Gebieten von besonderer ökologischer Bedeutung. Einerseits spenden sie Schatten, andererseits erhöhen sie die Verdunstung, was ebenfalls zur Abkühlung beiträgt. Dadurch können sie einen wichtigen Beitrag zum lokalen Mikroklima und zur Verringerung des urbanen Hitzeinsel-Effekts leisten. Des Weiteren binden vor allem ältere Bäume sowohl CO₂ als auch Staub und dienen als Lebensraum für Tiere und Pflanzen, wodurch die Biodiversität in der Stadt erhöht werden kann. [67]

In Wien wurde diese Bauweise bereits in einigen Projekten umgesetzt. Innerstädtisch ist beispielsweise der Umbau der Zollergasse im 7. Bezirk zu erwähnen, der im November 2021 fertiggestellt wurde. Als Pilotprojekt und Paradebeispiel gilt die Seestadt Aspern, wo das Schwammstadt-Prinzip erstmals großflächig angewandt wurde. [67] Das sogenannte „Quartier am Seebogen“ erhielt 348 Bäume und 8023 m² Straßengrün. Der erste Bauabschnitt wurde im Oktober 2022 fertiggestellt. [69]

6 Luftschadstoffe

Luft ist die Basis des menschlichen Lebens. Ihre Qualität wird aber seit Beginn der industriellen Revolution im 18. Jahrhundert durch menschliches Handeln stark beeinflusst. Welche Stoffe ausgeschieden werden, welche Folgen dies für Mensch und Umwelt hat und was straßenbaulich dagegen getan werden kann, wird in diesem Kapitel erläutert.

6.1 Luftschadstoffe und ihre Auswirkungen

Obwohl die Luftverschmutzung in westlichen Ländern in den letzten Jahrzehnten stetig abgenommen hat, ist sie immer noch ein wichtiges Thema im Hinblick auf die menschliche Gesundheit. Dies liegt einerseits daran, dass die Konzentration gewisser Stoffe besonders in Ballungsräumen immer noch hoch ist, andererseits daran, dass auch geringe Schadstoffkonzentrationen Krankheiten auslösen können. Um die Luftqualität zu quantifizieren, werden Indikatoren, also Konzentrationen gewisser Substanzen, betrachtet. Diese können partikulär, wie Feinstaub, oder gasförmig, wie Ozon, sein. Für diese Indikatoren werden Grenzwerte festgelegt – beispielsweise von der Weltgesundheitsorganisation WHO, der Europäischen Union oder den einzelnen Regierungen. Auffallend ist, dass diese voneinander abweichen. Die Grenzwerte der EU liegen zum Beispiel besonders für Feinstaub deutlich über jenen der WHO. [70] In Österreich legt das Immissionsschutzgesetz-Luft (IG-L) bundeseinheitliche Grenz- und Zielwerte sowie ein Protokoll bei Überschreitung fest. In diesem Fall ist der jeweilige Landeshauptmann bzw. die jeweilige Landeshauptfrau dafür verantwortlich, nach einer Zustandserhebung mit Identifikation der Quelle ein Maßnahmenprogramm zu erstellen. Diese Maßnahmen sollen die Emissionen im betroffenen Gebiet verringern und zur Wiedereinhaltung der Grenzwerte führen. [71]

Die WHO nennt die Luftverschmutzung die „größte umweltbezogene Bedrohung für die menschliche Gesundheit“ [72]. Die von verschmutzter Luft verursachte Krankheitslast liegt global auf einem ähnlichen Niveau wie jene des Rauchens oder ungesunder Ernährung und führt Schätzungen zufolge zu jährlichen Todesfällen und verlorenen gesunden Lebensjahren in Millionenhöhe. [72] Besonders dramatisch ist daran, dass nicht nur einzelne Menschen, die sich bewusst dazu entscheiden, das erhöhte Gesundheitsrisiko, beispielsweise des Rauchens, in Kauf zu nehmen, betroffen sind, sondern die Gefahr die gesamte Bevölkerung trifft. Besonders vulnerabel sind dabei Kinder sowie ältere und vorerkrankte Menschen. [70]

Die gesundheitlichen Wirkungen treten einerseits nach langfristiger Schadstoffexposition auf, können andererseits aber auch akut nach kurzfristigen Konzentrationsspitzen beobachtet werden. Betroffen sind unter anderem die Lungenfunktion, das Herz-Kreislauf-System und das Gehirn. Es können Krankheiten wie Asthma, COPD oder Herzrhythmusstörungen auftreten, das Risiko für Lungenkrebs, Schlaganfälle, Herzinfarkte, Diabetes sowie Demenz und Alzheimer steigt. Auch ungeborene Kinder sind betroffen – das Risiko für Komplikationen in der Schwangerschaft und für Früh- oder Totgeburten steigt. Des Weiteren gibt es Hinweise auf ein erhöhtes Risiko für eine verminderte Lungenfunktion und Asthma bei Kindern, deren Mutter in der Schwangerschaft vermehrt Luftschadstoffen ausgesetzt war. Gesamtgesellschaftlich erhöht sich die Mortalität. Diese Folgen verursachen wiederum vor allem im Gesundheitsbereich Kosten, die die Gesellschaft zu tragen hat. Schätzungen zufolge könnten durch Einhaltung der WHO-Grenzwerte in europäischen Großstädten europaweit über 30 Milliarden Euro pro Jahr an Gesundheitskosten gespart werden. [70]

Zu den wichtigsten Luftschadstoffverursachern zählen die Industrie, die Energieerzeugung, die Landwirtschaft und der Verkehr, der wegen seiner Nähe zu Menschen von besonderer Bedeutung ist. [70] Die jeweiligen Emissionsanteile sind je nach betrachtetem Schadstoff verschieden. Im Folgenden werden die jeweiligen Stoffe, ihre Auswirkungen und Quellen sowie mögliche Maßnahmen im Straßenbau erklärt.

6.1.1 Feinstaub

In der Luft befinden sich unzählige fest und flüssige Aerosole, die als Schwebstaub bezeichnet werden. Ein Teil dieses Gesamtschwebstaubs ist Feinstaub. Er umfasst die Fraktionen PM_{10} und $PM_{2,5}$. PM steht dabei für „Particulate Matter“, der Index gibt die Partikelgröße an. PM_{10} umfasst dabei die Fraktion mit 50 % Teilchen, die einen aerodynamischen Durchmesser von $10\ \mu\text{m}$ aufweisen, sowie kleineren Partikeln. Dasselbe Prinzip gilt für $PM_{2,5}$, diese Fraktion ist also eine Teilmenge von PM_{10} . Die Konzentration in der Luft wird in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ angegeben. Man unterscheidet weiters primär entstandenen oder sekundär gebildeten Feinstaub. Beide Arten können vom Menschen erzeugt werden oder aus natürlichen Quellen stammen – beispielsweise durch Vulkanausbrüche oder Bodenerosion. Auch Pilzsporen, Bakterien oder Blütenpollen können Feinstaub erzeugen. [73] Die wichtigsten menschengemachten PM_{10} -Quellen in Österreich waren im Jahr 2022, in absteigender Reihenfolge, die Industrie, Kleinverbraucher (Haushalte, Kleingewerbe, öffentliche Gebäude, etc. [74]), die Landwirtschaft, der Verkehr und die Energieerzeugung. Für $PM_{2,5}$ liegt der Verkehr auf Platz zwei hinter Kleinverbrauchern. [75] In urbanen Gebieten ist der Straßenverkehr als wichtigste Quelle zu nennen. Feinstaub entsteht dabei durch Verbrennungsmotoren sowie Abrieb von Reifen, Bremsen und Straßen und gelangt durch Aufwirbelung in die Luft. Die Schadstoffkonzentration ist daher nicht nur von der tatsächlichen Emission abhängig, sondern wird auch durch meteorologische Rahmenbedingungen, wie Windrichtung und -geschwindigkeit, beeinflusst. [73] Feinstaub führt von allen umweltbedingten Risiken zu den meisten vorzeitigen Todesfällen und hat zahlreiche Krankheitsbilder zur Folge. Dazu zählen Probleme mit dem Herz, wie Herzinfarkte und Herzrhythmusstörungen, und mit der Lunge, wie Allergien, Asthma, COPD und Lungenkrebs. Pro $10\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM_{10} steigt das Risiko für Lungenkarzinome um 22 %. Außerdem erhöht eine hohe Feinstaubbelastung das Risiko für Frühgeburten und ein niedriges Geburtsgewicht und stört das Lungenwachstum bei Kindern. [76] Die WHO empfiehlt daher für $PM_{2,5}$ einen Jahresmittelwert von $5\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ und einen maximalen Tagesmittelwert von $15\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ an nur drei bis vier Tagen im Jahr. Für PM_{10} liegen die empfohlenen Grenzwerte bei $15\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ bzw. $45\ \mu\text{g}/\text{m}^3$. [72] Das IG-L [71] nennt einen maximalen Jahresmittelwert von $25\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ für $PM_{2,5}$ sowie für PM_{10} ein Jahresmittel von $40\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ und einen Tagesmaximalwert von $50\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, der an 25 Tagen im Jahr überschritten werden darf.

Global gesehen sind durchschnittlich 25 % der Feinstaubbelastung in Städten auf den Straßenverkehr zurückzuführen. [77] In Österreich ist der Verkehr für etwa 20 % der $PM_{2,5}$ -Emissionen verantwortlich. [75] In den 1990er Jahren verursachten die Auspuffgase der Verbrennungsmotoren den größten Anteil des verkehrsbedingten Feinstaubes. Ihr Beitrag konnte aber in den letzten Jahrzehnten durch technische Neuerungen, wie Partikelfilter, deutlich reduziert werden. Heutzutage gilt der Abrieb von Reifen, Bremsen und Straßenbelägen als Hauptverursacher – fast 60 % der $PM_{2,5}$ -Emissionen und über 70 % der PM_{10} -Emissionen aus dem Verkehr sind darauf zurückzuführen. Wie viel Abrieb entsteht wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Dazu gehören die Fahrzeugart, die Reifenbreite und die Fahrweise. Die Fahrbahn ist ebenfalls von Bedeutung. [78] In diesem Kontext ist darauf hinzuweisen, dass die häufig als Lösung angesehenen Elektroautos zwar den abgasbedingten Feinstaubausstoß

vermeiden, durch ihr oft höheres Gesamtgewicht jedoch die im Folgenden beschriebenen, abriebbedingten Emissionen, vor allem im Bereich $< 2,5 \mu\text{m}$, verstärken können. [77]

Padoan et al. [79] teilen diese „non-exhaust emissions“, also Emissionen, die nicht aus den Abgasen stammen, nach dem Ursprung in vier Gruppen: direkter Bremsenverschleiß, direkter Reifenverschleiß, direkter Straßenverschleiß oder -abrieb und Straßenstaubsuspension. Letztere Gruppe umfasst alle Partikel auf der Straßenoberfläche, die durch Wind oder Fahrtwind aufgewirbelt werden. Diese Teilchen können durch Abrieb entstanden sein oder aus anderen Quellen, wie den Abgasen, dem Winterdienst oder Verschmutzung, stammen. Die chemische Zusammensetzung und Partikelgrößen dieser Emissionen können sehr unterschiedlich sein. Zu beachten ist, dass ursprünglich größere Teilchen durch mechanische Einwirkungen, wie Überfahrt, zerkleinert werden und schließlich zur Feinstaubbelastung beitragen können. [79] Während der Verschleiß von Bremsen vorrangig von maschinenbautechnischen und verkehrsplanerischen Aspekten abhängt, sind die Emissionen aus dem Straßenabrieb und dem Straßenstaub zu einem großen Teil eine Angelegenheit des Straßenbaus, weshalb im Folgenden besonders auf diese eingegangen wird. Zum Reifenverschleiß soll hier nur kurz erwähnt werden, dass er wie der Bremsenverschleiß zum Großteil von Eigenschaften des Fahrzeuges und des Reifens abhängt. Dennoch spielt auch die Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche eine Rolle. Einfluss haben einerseits das Material, die Porosität und die Textur der Deckschicht, andererseits wirken sich auch der aktuelle Straßenzustand sowie der vorherrschende Feuchtegrad auf den Reifenverschleiß aus. [80]

Für den Abrieb von Bremsen können verschiedene chemische Elemente, wie Eisen, Barium oder Kupfer, als zuverlässige Indikatoren verwendet werden. Es ist hingegen viel komplizierter den Verschleiß der Straßenoberfläche zu messen. Der Großteil der Straßendeckschichten besteht aus Asphalt oder Beton, also aus mineralischer Gesteinskörnung, die durch Zement oder Bitumen gebunden ist. Der verwendete Zuschlag wird meist ortsabhängig nach Verfügbarkeit gewählt. Durch diese Variabilität ist es schwierig, einheitliche Tracer festzulegen. Des Weiteren ähnelt die chemische Zusammensetzung des Abriebs jener des örtlich vorhandenen Straßenstaubs, was die Unterscheidung sehr problematisch macht. Bei Asphaltstraßen können organische Bitumenbestandteile, wie Maltene und Asphaltene, als Indikatoren herangezogen werden. Dennoch werden die beiden Gruppen von Staub, besonders für Betonstraßen, oft zusammengerechnet. [79] Zu den verwendeten Indikatoren zählen dann beispielsweise Silizium, Kalzium oder Kalium. [81] Studien in verschiedenen Ländern und Klimaregionen ergaben, dass der gesamte Straßenstaub, bestehend aus Straßenstaubsuspension und Straßenoberflächenabrieb, mit durchschnittlich 22 % knapp mehr zur PM_{10} -Belastung beiträgt als die Fahrzeugabgase mit durchschnittlich 21 % und deutlich mehr als der Bremsen- und Reifenverschleiß mit 7 % bzw. 4 %. Betrachtet man die $\text{PM}_{2,5}$ -Belastung stammt der größte Anteil mit gemittelt 24 % aus Abgasen. Der Beitrag des Straßenstaubs liegt mit 11 % auch hier über jenen des Bremsen- und Reifenabriebs, die je 9 % bzw. 2 % beitragen, wie in Abbildung 6.1 dargestellt ist. Zu beachten ist, dass die Ergebnisse, besonders für Straßenstaub, einer großen Streuung unterworfen sind und deutliche Unterschiede zwischen urbanen und ruralen Gegenden festgestellt werden konnten. Dennoch ist klar abzulesen, dass die „non-exhaust emissions“ und besonders auch der Straßenstaub bei Maßnahmen zur Verminderung der Feinstaubbelastung nicht vernachlässigbar sind. [79]

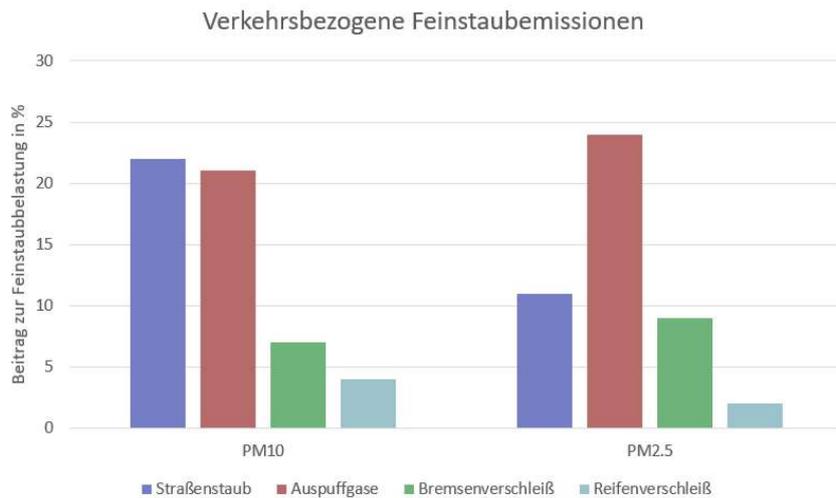


Abbildung 6.1: Durchschnittlicher Beitrag der verschiedenen Feinstaubquellen zur Gesamtbelastung. Eigene Darstellung unter Verwendung von [79]

Fahrbahnverschleiß entsteht durch die mechanische Belastung im Reifen-Fahrbahn-Kontakt. Besonders hoch ist er in Regionen, in denen im Winter Spikereifen verwendet werden. Oft werden bei Überfahrt zuerst grobe Partikel aus der Oberfläche gebrochen, welche jedoch durch weitere Beanspruchung zermahlen werden können. Dadurch gilt der Straßenverschleiß in nördlicheren Ländern im Winter und zu Frühlingsbeginn als Hauptverursacher der PM_{10} -Belastung und das obwohl dort besonders widerstandsfähige Gesteinskörnungen verwendet werden. In Ländern mit weniger extremen winterlichen Bedingungen ist die Verwendung von Spike-Reifen nicht üblich, weswegen beim Straßenbau ein geringerer Fokus auf die Resistenz der Straßenoberfläche gelegt wird. Durch diese geringere Robustheit leisten aber herkömmliche Reifen einen höheren Beitrag zum Fahrbahnverschleiß, weswegen die Bedeutung des Straßenabriebs bei der Feinstaubentstehung in südlicheren Regionen nicht unbedingt geringer ist. Aus straßenbaulicher Sicht stellt sich somit die Frage, welche Parameter bei herkömmlichen Aufbauten angepasst werden können bzw. welche alternativen Bauweisen angewendet werden können, um die Feinstaubbelastung durch Oberflächenverschleiß zu reduzieren. [81]

Da es schwierig ist, den genauen Beitrag des Straßenverschleißes zur Feinstaubbelastung zu ermitteln, gibt es noch wenig Daten dazu. Eine Möglichkeit besteht darin, beim Winterdienst bewusst Gestein oder Sand mit einer vom Straßenzuschlag abweichenden mineralogischen Zusammensetzung zu wählen. So kann der entstehende Feinstaub der Quelle zugewiesen werden. Messungen dieser Art ergaben, dass bei der Verwendung von Spike-Reifen der Fahrbahnverschleiß mit circa 50 % als PM_{10} -Hauptverursacher gilt, wobei der ausgebrachte Sand zu Erhöhung der Griffigkeit nur einen etwa halb so großen Beitrag leistet. Als Ursache dafür wird neben den aggressiven Spike-Reifen der sogenannte „Sandpapier-Effekt“ genannt. Dieser beschreibt, dass der Fahrbahnabrieb durch Partikel auf der Straßenoberfläche deutlich erhöht werden kann. Diese Teilchen können beispielsweise aus dem Winterdienst oder sonstiger Verschmutzung stammen und tragen somit nicht nur zum Fahrbahnverschleiß, sondern bei Zerkleinerung auch zur Straßenstaubsuspension bei. Messungen in Gebieten ohne Spike-Reifen und mit verstärktem Winterdienst schätzten den Beitrag des Fahrbahnverschleißes zur PM_{10} -Emission auf 11 %. [81]

Bei der Planung einer Straße, die im Hinblick auf die Feinstaubemissionen durch Fahrbahnabrieb günstig ist, gibt es einige Parameter, die optimiert werden können. Gut geeignet ist

Splittmastixasphalt, der bei der Verwendung geeigneter Gesteinskörnung sehr verschleißresistent ist. Die Eignung des Zuschlags ist dabei stark vom Größtkorn abhängig – ein größerer Durchmesser führt tendenziell zu geringerem Verschleiß. Des Weiteren sollte das verwendete Korn möglichst widerstandsfähig gegen Abrieb sein. Zur Klassifizierung können der Los-Angeles-Koeffizient oder der Nordische Abriebwert herangezogen werden. Diese geben den Masseverlust bei mechanischer Beanspruchung an und sollten dadurch möglichst niedrig gewählt werden. [81] Es ist hinzuzufügen, dass weniger Abrieb tendenziell zu weniger Feinstaub führt, dennoch ist dieser Zusammenhang nicht für jedes Gestein gegeben, weshalb eine genauere Untersuchung sinnvoll ist. [77] Die Beimengung von Gummi aus Altreifen kann ebenfalls helfen, die PM₁₀-Emission einer Asphaltfahrbahn zu reduzieren. Um den gewünschten Effekt zu erzielen, muss die Sieblinie richtig, am besten mit Ausfallkörnung, gewählt werden. [81] Offenporiger Asphalt weist eine etwas höhere Anfälligkeit gegenüber Abrieb als das dichte Äquivalent auf. Dennoch können sich poröse Oberflächen positiv auswirken, da sie durch ihre Hohlräume die Straßenstaubsuspensionen durch Aufwirbelung verringern können. Auch der Zustand der Straße spielt eine wichtige Rolle. So produziert beschädigter Asphaltbeton zehnmal mehr Abrieb als jener in gutem Zustand. [77] Betondeckschichten sind meist dauerhafter und widerstandsfähiger als jene aus Asphalt. Obwohl der Gesamtabrieb dadurch geringer ist, zeigen Untersuchungen, dass die Verwendung von Zement als Bindemittel dennoch zu einer höheren PM₁₀-Emission führt. Dies könnte an der fehlenden Verkittungswirkung des klebrigen Bitumens liegen, die die Verteilung von einzelnen feinen Partikeln verhindert. Der gewählte Straßenaufbau beeinflusst aber nicht nur die Anfälligkeit für Verschleiß, sondern auch die chemische Zusammensetzung des entstehenden Staubs. Beispielsweise ist Abrieb von Betonstraßen besonders kalziumreich, wohingegen jener von Straßen aus Asphalt mit Hochofenschlacke hohe Eisen-, Mangan- und Chromwerte aufweist. Diese verschiedenen chemischen Zusammensetzungen resultieren in einer unterschiedlichen Tendenz größerer Staubpartikel, zu Feinstaub zu zerfallen. [81]

Zum Straßenstaub zählen alle feinkörnigen Feststoffe, die sich auf der Straßenoberfläche befinden. Sie können durch Wind oder Fahrtwind aufgewirbelt werden und beeinträchtigen dann die Luftqualität – der Teil der Straßenstaubsuspensionen mit einem Durchmesser < 10 µm trägt so auch zur Feinstaubbelastung bei. Die Quellen sind vielfältig. Der Staub kann unter anderem von Baustellen oder Flächen abseits der Straße sowie aus dem Winterdienst bzw. der Straßeninstandhaltung stammen. Auch atmosphärische Ablagerungen und Pflanzenpollen tragen zum Straßenstaub bei. Ebenfalls spielen der Verschleiß von Fahrzeugteilen und der Fahrbahn sowie die Auspuffgase von Verbrennungsmotoren eine wichtige Rolle. Anders als die Teilchen, die zum direkten Bremsen-, direkten Reifen- oder direkten Straßenverschleiß zählen, landen diese, zum Straßenstaub gehörigen Teilchen zuerst auf der Oberfläche und werden zeitverzögert wieder aufgewirbelt. Die Gruppe der Straßenstaubsuspension ist also zum Teil von den anderen „non-exhaust“-Emissionsgruppen abhängig und die Unterscheidung nicht immer einfach. Die genaue Zusammensetzung des Gemisches ist stark standort- und klimaabhängig. Beispielsweise stammt in urbanen Gebieten und bei nasser oder vereister Straße ein größerer Anteil aus dem Fahrzeugverschleiß, während in trockenen Gegenden der Staub von benachbarten unversiegelten Flächen eine wichtige Rolle spielt. Wichtig ist zu beachten, dass ursprünglich größere Partikel durch mechanische Prozesse in kleinere Teilchen zerfallen können und so zur Staub- und Feinstaubbelastung beitragen können. [82] Die Vielfalt der Quellen zeigt sich auch bei der Betrachtung der chemischen Zusammensetzung des Straßenstaubs. Elemente wie Silizium, Aluminium oder Kalzium sind auf den Straßenabrieb oder den Staub benachbarter unversiegelter Flächen zurückzuführen. Aus dem Verschleiß von Reifen und Bremsen werden unter anderem Metalle und Halbmetalle wie Antimon, Kupfer, Zink oder Chrom eingetragen. Aber auch

Stoffe wie Palladium, Rhodium oder Platin können im Straßenstaub vorgefunden werden. Diese stammen aus dem Verschleiß von Katalysatoren zur Abgasnachbehandlung und sind aufgrund ihrer Toxizität für Menschen und Gewässer besonders problematisch. [83]

Denby B. R. et al. [82] unterscheiden fünf Quellen des Straßenstaubs, die nicht mit dem verkehrsbedingten Verschleiß von Reifen, Bremsen oder Straße zusammenhängen. Diese sind der Oberflächenabrieb, Sand zur Erhöhung der Griffigkeit, diffuse Quellen, atmosphärische Ablagerungen und Tausalz. Der Fahrbahnabrieb und der Einfluss des griffigkeitserhöhenden Sandes wurden vorangehend bereits unter dem Stickwort des „Sandpapier-Effekts“ beschrieben. Unter den Überbegriff der diffusen oder flüchtigen Quellen fallen eine Vielzahl von Herkunftsmöglichkeiten. Beispielsweise kann Staub von Baustellen oder unbefestigten Flächen von Autoreifen oder Fußgänger*innen transportiert werden oder von Gehwegen auf die Straßenoberfläche fallen. Auch Wasser oder Wind können Staub auf die Fahrbahnoberfläche tragen. Die tatsächlich vorzufindenden Prozesse sind dabei stark von den örtlichen Gegebenheiten abhängig. Zu den atmosphärischen Ablagerungen zählt beispielsweise Saharasand, der durch Winde tausende Kilometer weit transportiert werden kann. Durch die Unregelmäßigkeit und den meist geringen Einfluss kann diese Quelle jedoch vernachlässigt werden. Eine wichtige Rolle spielt hingegen das im Zuge des Winterdienstes ausgebrachte Tausalz. Problematisch ist in diesem Kontext Salz, das nach dem Enteisen auf der Fahrbahnoberfläche verbleibt. Untersuchungen zeigten, dass Streusalz im Winter für 10 % bis 35 % der PM₁₀-Emission verantwortlich gemacht werden kann. Messungen konnten salzbedingte PM₁₀-Konzentration von bis zu 40 µg/m³ am Straßenrand feststellen. Schätzungen zufolge verursacht ein kg/m² ausgebrachtes Tausalz eine straßennahe PM₁₀-Belastung von 4,1 ± 3,4 µg/m³. Bei starker Salzstreuung erreichen die daraus folgenden PM₁₀-Emissionen also die Größenordnung der abgasbedingten Belastung. [82]

Wie viel Staub tatsächlich auf der Straße vorzufinden ist, ist neben der produzierten Staubmenge von weiteren Faktoren abhängig. Feuchte oder vereiste Oberflächen binden Staub und verhindern die Aufwirbelung, weshalb ein Zusammenhang zwischen dem Feuchtegrad der Fahrbahn und der PM₁₀-Belastung am Straßenrand besteht. Des Weiteren spielt die Textur der Straßenoberfläche eine wichtige Rolle. Je grober, desto weniger Staub ist für die Suspension verfügbar. [82] So reduzieren auch offenporige Deckschichten durch ihre oberflächlichen Hohlräume die aufwirbelbare Staubmenge. [81]

Feinstaub entsteht aber nicht nur im Betrieb, sondern auch während des Baus einer Straße. Besonders hohe PM_{2,5}-Emissionen sind beim Einsatz von heißgemischtem Asphalt direkt am Fertiger messbar, wobei die Belastung der Arbeiter*innen durch die Auspuffgase des Dieselmotors weiter erhöht wird. Wegen der Abgase der zur Verdichtung eingesetzten Walzen steigt die PM_{2,5}-Konzentration danach sogar noch weiter an. Die messbaren PM_{2,5}-Emissionen nehmen dann mit der Zeit ab, da die Asphaltdecke abkühlt. Wie viel Feinstaub freigesetzt wird hängt vor allem von der Mischguttemperatur ab, wobei höhere Temperaturen zu mehr PM_{2,5} führen. Ebenfalls Einfluss hat die beim Einbau vorherrschende Lufttemperatur. Die Konzentration steigt umso höher, je größer die Temperaturdifferenz zwischen einzubauendem Bitumen und der Außenluft ist. Jedoch spielen auch andere unkontrollierbare Faktoren, wie die Windgeschwindigkeit, eine Rolle. [84]

6.1.2 Flüchtige organische Verbindungen (VOC)

Die Gruppe der flüchtigen organischen Verbindungen, im Englischen Volatile Organic Compounds (VOC), umfasst verschiedene dampf- oder gasförmige Luftschadstoffe organischen Ursprungs. Dazu zählen unter anderem Kohlenwasserstoffe, Aldehyde, Alkohole und Säuren, wobei die insgesamt

mehreren hundert verschiedenen Verbindungen in sehr flüchtige und schwerflüchtige organische Verbindungen unterteilt werden. Ihre Quellen sind sehr vielfältig – grob lassen sich natürliche und anthropogene Ursprünge unterscheiden. Erstere umfassen verschiedene biologische Prozesse, wie beispielsweise den Stoffwechsel oder den Zerfall organischer Strukturen. Die menschengemachten Emissionen stammen unter anderem aus unvollständiger Verbrennung, beispielsweise bei Verbrennungsmotoren, oder entstehen als Nebenprodukt der Industrie. Besonders viele VOC werden durch Lösungsmittel freigesetzt, aber auch unzählige andere Produkte, wie Bau- und Reinigungsmaterialien sowie Lacke, tragen zum Ausstoß bei. [85]

Die in der Luft vorzufindenden VOC-Konzentrationen sind meist so gering, dass keine gesundheitlichen Folgen zu befürchten sind. Anders sieht das jedoch während oder nach Bau- sowie Renovierungsarbeiten aus, da die Belastung durch die verwendeten Baumaterialien vor allem in Innenräumen stark erhöht werden kann. Akut kann es zu Reizungen der Augen, der Nase oder des Rachens sowie zu Müdigkeit, Kopfschmerzen oder Schwindel kommen. [86] Arbeiter*innen im Straßenbau berichteten weiters von Kurzatmigkeit und Übelkeit. Auch das zentrale Nervensystem, die Leber, die Nieren sowie das menschliche Blut werden angegriffen. [84] Sind Personen den Stoffen chronisch ausgesetzt, kann eine mutagene oder krebserregende Wirkung auftreten. [86]

Im Kontext des Straßenverkehrs werden meist nur die Emissionen aus den Verbrennungsmotoren genannt. Dennoch können über 50 Arten von zum Teil giftigen VOC in Bitumen gefunden und den Dämpfen heißgemischten Asphalts ein karzinogener Effekt nachgewiesen werden. Den Großteil der vorzufindenden Verbindungen machen Benzol, Toluol und Ethylbenzol aus, wobei die jeweiligen Anteile und der Gesamtausstoß stark von der Temperatur des Mischgutes abhängen. Wie viele VOC beim Einbau emittiert werden, ist des Weiteren von der gewählten Deckschichtbauweise und dem verwendeten Bitumen abhängig. Untersuchungen zeigten, dass polymermodifiziertes Bitumen weniger und poröser Asphalt mehr VOC als herkömmlicher Asphalt abgeben. Ebenfalls konnte festgestellt werden, dass die VOC-Konzentration in der Luft während des Asphalteinbaus am höchsten ist und danach mit Absinken der Temperatur rasch abnimmt. Die höchste Belastung der Arbeiter*innen ist daher direkt am Fertiger und in der Nähe der asphaltliefernden LKWs zu erwarten. [84]

Neben der direkten Belastung der Arbeiter*innen durch VOC sind weitere Gesundheits- und Umweltprobleme möglich, wenn die von Asphalt freigesetzten Gase mit Ozon oder Stickoxiden in der Luft reagieren. Die entstehenden Produkte, sogenannte sekundäre organische Aerosole (SOA), tragen zur PM_{2,5}-Belastung bei und können so schädlicher sein als die ursprünglich freigesetzten Stoffe. Außerdem kann dadurch photochemischer Smog entstehen, der die Sicht verschlechtert. [84] [87]

Im Sinne des Arbeitsschutzes kommt aus diesen Gründen Niedrigtemperaturasphalten eine immer höhere Bedeutung zu. Durch die hohe Temperaturabhängigkeit der VOC-Emissionen kann die Verringerung der Verarbeitungs- und Einbautemperatur einen wichtigen Beitrag leisten. Untersuchungen zeigen, dass die gesundheitsschädlichen Bitumendämpfe durch eine Temperaturabsenkung um 25 °C um bis zu 75 % reduziert werden können, wobei die tatsächliche Wirksamkeit auch von anderen Faktoren abhängt. [88] Niedrigtemperaturasphalt wird im Kontext der CO₂-Emissionen in Kapitel 6.1.4 genauer behandelt.

Die Freisetzung von VOC endet aber nicht mit dem Fertigstellen der Straße. Auch im Betrieb können von Asphaltstraßen Schadstoffe abgegeben werden. Besonders in den heißen Sommermonaten dünnen aus der durch Wärme und Sonneneinstrahlung aufgeheizten Oberfläche VOC aus, wodurch wie beschrieben auch SOA entstehen können. Amerikanische Untersuchungen zeigten, dass sich die Emissionen organischer Schadstoffe beim Anstieg der Oberflächentemperatur von 40 °C auf 60 °C

verdoppeln und bei Erwärmung darüber hinaus je 20 °C um weitere 70 % steigen. Bei 60 °C liegt die Emission über längere Zeit stabil bei 0,1 Milligramm pro Minute und Kilogramm Asphalt, bei höheren Temperaturen ist sie anfangs höher, fällt dann aber rascher ab. Ein realistischer Temperaturbereich für Asphaltstraßen liegt im Sommer bei 47 °C bis 67 °C. Vor allem in urbanen Gebieten kann dieser Effekt daher zu einer deutlichen Beeinträchtigung der Luftqualität führen, direkt sowie sekundär. Des Weiteren konnte ein Einfluss der UV-Strahlung festgestellt werden. Eine UV-Exposition, wie sie bei starker Sonneneinstrahlung auftritt, kann einen Anstieg der Gesamtemissionen um rund 300 % bewirken. Bei längerer Einwirkungsdauer fällt dieser Effekt langsamer ab als die temperaturbedingte Erhöhung. Die Studienautoren folgern aus diesen Erkenntnissen, dass der Einfluss von Asphalt auf die Luftqualität bis jetzt nicht nur unterschätzt wurde, sondern in Großstädten, wie Los Angeles, sogar höher als jener aus der Verwendung fossiler Brennstoffe sein kann. [87]

Um die Gesundheits- und Umweltbelastung durch VOC und SOA aus Asphalt zu reduzieren, versuchten Chen S. et al. [89] umweltfreundlich-modifizierten Asphalt herzustellen, der tragfähig und dauerhaft genug für den Einsatz im Straßenbau ist. Hierzu fügten sie dem Asphaltmischgut verschiedene Mengen von Additiven zu. Zur Anwendung kamen Aktivkohlepulver, Al(OH)₃-Pulver und Tenside. Danach führten sie Messungen der VOC-Emissionen sowie Versuche zur Bestimmung der Asphalteeigenschaften durch. Es zeigte sich, dass ein Mischgut mit 5 % Aktivkohlepulver und 3 % Tensiden bei der Verringerung der VOC-Emissionen mit Abstand am besten abschnitt. Der Ausstoß konnte im Test auf unter ein Zehntel des Wertes des herkömmlichen Asphalts reduziert werden. Die Mischung wies zwar ein schlechteres Tieftemperaturverhalten und eine geringere Duktilität auf, der Erweichungspunkt lag jedoch um 7,7 °C höher als beim Referenzasphalt und die Eindringtiefe beim Penetrationsversuch sank um 1,4 mm. Die Autoren sprechen aus diesen Gründen eine Empfehlung für diese Additivbeimengungen aus. [89]

6.1.3 Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) sind lipophile, meist farblose Verbindungen, die auf den Menschen stark gesundheitsschädlich wirken. Derzeit sind etwa 250 verschiedene Arten bekannt, von denen einige als krebserregend eingestuft wurden. Sie entstehen bei der unvollständigen Verbrennung von organischen Substanzen, wie Holz, Kohle oder Öl. Natürlich können sie durch Waldbrände oder Vulkanaktivitäten verursacht werden, jedoch zählen anthropogene Quellen, wie Mineralöl- oder Kohleverarbeitung, zu den Hauptverursachern. Heute werden PAK meist im Kontext der Lebensmittelproduktion genannt, wo sie direkt durch die Verarbeitungsprozesse oder indirekt durch Verunreinigung eingetragen werden. [90]

Hohe PAK-Mengen sind auch im früher zur Straßenbefestigung verwendeter Teer enthalten. Dieses flüssige bis halbfeste Bindemittel entsteht bei der Pyrolyse von Kohle und enthält unter anderen die PAK Naphthalin und Benzo[a]pyren. Teer gilt als karzinogen und darf nur unter besonderer Vorsicht verarbeitet werden. Aus diesem Grund wurde es vor etwa 40 Jahren verboten und durch das bei der Erdölverarbeitung gewonnene Bitumen ersetzt. [91] Besondere Bedeutung kommt den PAK aus Teer heute dennoch noch im Kontext des Recyclings zu, das in Kapitel 7 behandelt wird. Im verbauten Zustand stellen Teerschichten grundsätzlich keine Umwelt- oder Gesundheitsgefährdung dar, da die PAK fest eingebunden und schwer löslich sind. Wird die Straße jedoch aufgebrochen oder zur Wiederverwendung aufbereitet, kann es zur Freisetzung kommen, weswegen strenge rechtliche Vorgaben zum Umgang mit solchen Schichten bestehen. [92]

Auch Bitumen enthält PAK, jedoch in deutlich geringeren Mengen als Teer. Während bei teergebundenem Asphalt mit 2.500 bis 12.500 mg PAK/kg Asphalt zu rechnen ist, liegt der Gehalt bei der Verwendung von Bitumen als Bindemittel nur bei 2,5 bis 5 mg PAK/kg Asphalt. [92] Die bei der Verarbeitung messbare Belastung hängt vom verwendeten Bitumen, dem Bindemittelgehalt und der gewählten Asphalzzusammensetzung ab. Einen großen Einfluss hat auch die Temperatur des Mischguts – je höher, desto mehr PAK werden ausgeschieden. Eine Gefährdung der Arbeiter*innen ist aufgrund der geringen Konzentrationen in der Luft jedoch nicht gegeben. [84]

6.1.4 Kohlenstoffdioxid (CO₂)

Kohlenstoffdioxid (CO₂) ist wohl der am häufigsten diskutierte Luftschadstoff, der sich vor allem durch seine negative Umweltwirkung auszeichnet, denn das durch menschliche Aktivitäten ausgestoßene CO₂ trägt mit etwa 60 % am meisten zum menschengemachten Treibhauseffekt bei. [93]

Das aus Kohlen- und Sauerstoff bestehende, geruch- und farblose Gas ist ein natürlicher Luftbestandteil. [94] Es entsteht bei verschiedenen natürlichen Prozessen, wie der Atmung von Lebewesen oder der Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Substanzen, beispielsweise fossilen Energieträgern. Pflanzen sind hingegen in der Lage, CO₂ aus der Luft aufzunehmen und es zu binden, also in Biomasse umzuwandeln. Auch Gewässer, wie Seen und die Weltmeere, dienen als CO₂-Senken. Durch diesen natürlichen Kohlenstoffdioxidkreislauf blieb der Anteil des CO₂ in der Atmosphäre in den letzten 10.000 Jahren konstant bei etwa 280 ppm. Dies änderte sich durch den Beginn der Industrialisierung im 18. Jahrhundert. Die anthropogenen CO₂-Emissionen führten seither dazu, dass die Konzentration immer weiter steigt. 2019 lag der Anteil bereits bei 415 ppm, also 0,0415 %. [95]

Treten besonders hohe Konzentrationen auf, kann es beim Menschen zu einer Kohlendioxidvergiftung kommen. [94] CO₂ ist aber vorrangig nicht wegen seiner gesundheitsschädlichen Wirkung, sondern wegen seinem Beitrag zum Treibhausgaseffekt und damit zum Klimawandel problematisch. Die anthropogene Klimaerwärmung wird durch vermehrte Emissionen von Spurengasen in der Atmosphäre verursacht. Zu diesen zählen neben CO₂ auch Kohlenstoffmonoxid, Methan, Distickstoffmonoxid, auch Lachgas genannt, und halogenierte Kohlenwasserstoffe, wie FCKW. Alle Stoffe weisen unterschiedlich hohe Treibhauspotentiale auf, weshalb zum Vergleich CO₂-Äquivalente eingeführt wurden. Methan werden beispielsweise 28 CO₂-Äquivalente und Lachgas sogar 265 CO₂-Äquivalente zugewiesen. Durch die Spurengase in der Atmosphäre gab es schon immer einen natürlichen Treibhauseffekt. Sie reduzieren die Rückstrahlung der Sonnenenergie ins Universum, erhöhten so die Oberflächentemperatur der Erde von etwa -18 °C auf +14 °C und machten damit das Leben auf der Erde, wie wir es kennen, erst möglich. Ein neues Phänomen ist der anthropogene Treibhausgaseffekt, der durch die kontinuierlich steigenden Konzentrationen der klimaaktiven Spurengase in den letzten 200 Jahren verursacht wird. [95] Im Zeitraum 2011 bis 2020 lag die durchschnittliche weltweite Lufttemperatur bereits 1,1 °C über dem vorindustriellen Niveau. Schätzungen zufolge wird die Temperatur alle zehn Jahre um 0,2 °C weitersteigen, wenn keine wirksamen Gegenmaßnahmen getroffen werden. Steigen die Treibhausgasemissionen sogar noch weiter, kann dies die Erwärmung auch noch beschleunigen. Je höher der Temperaturanstieg, desto weitreichender die Folgen – dazu zählen direkte Auswirkungen, wie häufigere Starkregen- und Überschwemmungsereignisse, Dürren und der Anstieg des Meeresspiegels, aber auch indirekte Konsequenzen. So sind beispielsweise die Stabilität des Ernährungssystems und die sichere Trinkwasserversorgung weltweit in Gefahr, was zu Hungernöten und Krankheiten führen kann. Besonders betroffen sind Regionen in Afrika, dem südlichen Asien und Zentralamerika. [53]

Jedes Jahr werden von den Menschen ungefähr 47,7 Gt CO₂ bzw. 13,0 Gt Kohlenstoff (C) in die Atmosphäre entlassen, von denen circa 10,5 Gt C aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe und etwa 0,5 Gt C aus der Zementproduktion stammen. Die natürlichen Senken können jährlich jedoch nur 8,1 Gt C bzw. 29,6 Gt CO₂ aufnehmen, der Rest trägt zum anthropogenen Klimawandel bei. [95] Betrachtet man alle Treibhausgase, war die Herstellung von Zement im Jahr 2019 für 8 % der globalen Emissionen verantwortlich, wobei der weltweite Ausstoß in den nächsten Jahren durch den Bevölkerungszuwachs und die fortschreitende Urbanisierung weiter zunehmen könnte. Prognosen zufolge könnte der globale Zementverbrauch bis zum Jahr 2050 verglichen mit 2014 um 12 % bis 23 % steigen. Gelingt es nicht, den Herstellungsprozess emissionsärmer zu gestalten, könnte dies fatale Folgen für das Klima haben. [96]

Beim Produktionsprozess von Zement entstehen an verschiedenen Stellen prozess- und energiebedingt Treibhausgase. Der Vorgang der Entsäuerung des Klinkers ist dabei für etwa 50 % des Ausstoßes verantwortlich. [96] Die Entsäuerung ist die erste Stufe des Brennvorgangs. Bei Temperaturen ab 850 °C spaltet sich das Ausgangsmaterial Kalkstein zu Calciumoxid und CO₂. Eine Tonne Rohmehl scheidet circa 340 kg CO₂ aus, wobei ein Teil davon später bei der Karbonatisierung vom Beton wieder aufgenommen wird. Die Sinterung stellt die zweite Stufe des Brennvorgangs dar. Bei 1.450 °C bildet sich aus dem vorgewärmten, entsäuerten Material der Klinker. Um die erforderlichen hohen Temperaturen bereitstellen zu können, können beispielsweise fossile Brennstoffe eingesetzt werden, wobei hohe Emissionen entstehen und limitierte Ressourcen verbraucht werden. Wurden früher vorrangig Steinkohle und Heizöl verwendet, werden heute in Österreichs Zementwerken 80 % davon durch alternative Brennstoffe ersetzt und stattdessen Abfälle, wie Altreifen und nicht rezyklierbare Kunststoffe, thermisch verwertet. [97] Weitere energiebedingte CO₂-Emissionen entstehen durch den Transport und den Stromverbrauch von Mahl- oder Fördermaschinen. [96] Gesamt war im Jahr 2021 in Österreich pro Tonne Zement mit einem Ausstoß von 549 kg CO₂ zu rechnen. EU-weit lagen die durchschnittlichen Emissionen mit 619 kg CO₂ höher. In den USA verursachte die Produktion einer Tonne Zement sogar 751 kg CO₂. [97]

Neben dem wichtigen Thema des Recyclings, auf das in Kapitel 7 eingegangen wird, gibt es weitere Strategien, um Beton umweltfreundlicher zu machen. Einerseits kann Beton, wo möglich, durch alternative Baustoffe ersetzt werden, andererseits können der Anteil des Zements im Beton bzw. der Anteil des Klinkers im Zement reduziert werden. Des Weiteren könnten der Produktionsprozess energieeffizienter gestaltet und die Energie nachhaltiger gewonnen werden. [96]

Um den Klinkeranteil im Beton zu reduzieren, werden schon seit Jahrzehnten Hüttensand aus der Stahlproduktion und Flugasche aus Kohlekraftwerken als Substitutionsmaterial eingesetzt, was zu einer deutlichen Reduktion des CO₂-Ausstoßes des Betons führt. Dadurch können 30 % bis 65 % der Treibhausgasemissionen eingespart werden. 2019 wurden in Deutschland aber bereits 81 % der anfallenden Flugasche für Beton verwendet – die Ressourcen sind limitiert. Zukünftig könnte die Verfügbarkeit durch klimafreundliche technische Neuerungen in der Stahlproduktion, wie den Umstieg auf Elektroöfen, und den Kohleausstieg des Energiesektors noch weiter sinken. Aktuell wird daher an alternativen Substitutionsmaterialien geforscht. [96] Ein hohes Potenzial weisen aufgrund ihrer weltweit hohen Verfügbarkeit calcinierte Tone und Kalkstein auf. Obwohl calcinierte Tone auch energieintensiv gebrannt werden müssen, verursacht dies dennoch weniger CO₂ als bei der Entsäuerung des Zements anfallen würde. Die mögliche Reduktion des Treibhauspotentials liegt daher bei etwa 40 % und kann durch zusätzliche Beimengung von Kalksteinmehl noch weiter verbessert werden. Beton, bei dem Klinker durch Kalksteinmehl ersetzt wurde, weist dabei sehr gute

Festbetoneigenschaften auf. Die klima- und gebrauchstechnische Optimierung des Dreistoffgemischs aus Klinker, Kalkstein und calciniertem Ton ist gegenständlich Aufgabe der Forschung. [98]

Im am 20. August 2024 präsentierten österreichischen Energie- und Klimaplan [99] wird nun auch ein bisher verbotener Weg vorgestellt. Prozesse, bei denen Treibhausgasemissionen nicht verhindert werden können, gelten als CCUS geeignet. Darunter fällt auch die Zementproduktion. [99] CCUS steht dabei für „Carbon Capture Utilization and Storage“, was bedeutet, dass CO₂ aus industriellen Abgasen oder der Luft abgeschieden wird und so nicht atmosphärisch zum Treibhauseffekt beitragen kann. Das gesammelte CO₂ kann dann entweder langfristig gespeichert werden oder im Sinne der Kreislaufwirtschaft als Rohstoff für andere Prozesse dienen. Mögliche Speicherorte können unterirdisch am Land oder unter dem Meer liegen – es eignen sich beispielsweise leere Öl- oder Gasfelder. [100] Neben der benötigten Infrastruktur muss in Österreich aber zuerst ein grundlegender rechtlicher Rahmen geschaffen werden. [99]

Bei der Gewinnung von Bitumen fällt verglichen mit der Produktion von Zement deutlich weniger CO₂ an, da zur Herstellung des Erdölnebenprodukts 80 % weniger Energie benötigt werden und keine prozessbedingten Emissionen, wie bei der Entsäuerung, auftreten. Die Errichtung eines Quadratmeters Asphaltstraße verursacht daher nur etwa 50 % der Treibhausgase eines Quadratmeters Beton. Asphalt wird bei 120 °C bis 250 °C hergestellt und eingebaut. Die Bereitstellung dieser hohen Temperaturen ist jedoch energieintensiv und verursacht große CO₂-Emissionen, weswegen hier ein hohes Einsparungspotenzial besteht. Temperaturabgesenkte Asphalte bzw. Niedrigtemperaturasphalte nutzen dieses Potenzial. [101]

Die Herstellungs- und Verarbeitungstemperatur temperaturreduzierter Asphalte liegt 20 °C bis 30 °C unter jener herkömmlichen Asphalts, was sich nicht nur positiv auf die Schadstoffbelastung der Arbeiter*innen auswirkt, wie in Kapitel 6.1.2 beschrieben, sondern auch CO₂ spart. Zur Temperaturabsenkung gibt es mehrere Möglichkeiten. Dem Mischgut können viskositätsverändernde mineralisch oder organische Zusätze bzw. viskositätsverändernde Bindemittel zugefügt werden. Auch die Beimengung von oberflächenaktiven Additiven ist möglich. Die Schaumbitumen-Technologie bietet einen weiteren Ansatz. [102] Laut Deutschem Asphaltverband spart eine Temperaturabsenkung um 30 °C dabei bei der Herstellung etwa 9 kWh Energie pro Tonne Asphalt, was circa 0,9 Liter Heizöl entspricht. Werden so täglich beispielsweise 2.000 t Asphaltmischgut produziert, können damit 6 t CO₂ eingespart werden. [103] Messungen direkt an Asphaltmischanlagen ergaben außerdem nicht nur eine CO₂-Emissionsminderung durch Niedrigtemperaturasphalt von bis zu 40 %, sondern zeigten auch, dass andere Luftschadstoffe, wie Schwefeldioxid und Stickoxide, deutlich reduziert werden können. [88] Geregelt wird temperaturreduzierter Asphalt beispielsweise im „Merkblatt für Temperaturabsenkung von Asphalt“ [104] der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.

2018 wurde in Österreich ein „ultra Temperatur abgesenkter Asphalt“ vorgestellt, der laut EN 13108 CE-konform ist. Er soll bei nur 60 °C gemischt und bei Temperaturen zwischen 0 °C und 50 °C eingebaut werden. Dadurch eignet er sich nicht nur für die Straßenerrichtung bei kühlem Wetter, sondern soll laut einer Studie der Montanuniversität Leoben verglichen mit herkömmlichen Asphalt 50 % weniger Energie verbrauchen. Das Mischgut mit temperaturabsenkenden Additiven eignet sich nicht nur für Asphaltbeton und Splittmastixasphalt, sondern kann auch für offenporigen Asphalt verwendet werden. Laut Hersteller soll der Asphalt besonders gut verarbeitbar sein und hervorragende mechanische Eigenschaften aufweisen. Eine gebrauchsverhaltensorientierte Prüfung (GVO), die im Straßenbautechnischen Labor der TU Wien durchgeführt wurde, bestätigt eine große Gebrauchsspanne. [105]

Ein weiterer Ansatz zur Verringerung des CO₂-Fußabdrucks von Asphalt wurde in Basel entwickelt. Der „Grüner Asphalt“ mit 60 % Recyclingasphalt und 3 % Pflanzenkohle soll aufgrund seiner Zusammensetzung CO₂-negativ sein. Zur Erzeugung werden Pflanzen durch Pyrolyse zu festem Kohlenstoff verkoht, wodurch der Kohlenstoff gebunden ist und nicht zum Kohlenstoffkreislauf und der Bildung von CO₂ beitragen kann. Die Beimengung der Pflanzenkohle zum Asphaltmischgut soll einerseits dazu beitragen, die mechanischen Eigenschaften der Straße zu verbessern, wodurch ihre Lebensdauer erhöht wird. Andererseits stellt Pflanzenkohle, wie beschrieben, eine Kohlenstoffsenke dar, weswegen die Verwendung als Zuschlag „negative“ Emissionen verursacht – es wird mehr CO₂ gebunden als ausgestoßen. Laut den Entwicklern fallen bei der Errichtung circa 31 kg CO₂-Äquivalente pro Tonne Belag an. Da jedoch durch die verwendete Pflanzenkohle etwa 54 kg CO₂-Äquivalente pro Tonne gespeichert werden, resultiert eine negative Emission von -23 kg CO₂-Äquivalente. Eine 450 m² große Testfläche mit 50 % Recyclingasphalt und 2 % Pflanzenkohle lieferte bereits vielversprechende Ergebnisse. [106] Bei großflächigem Einsatz könnten so pro Jahr allein in Basel etwa 1.250 t CO₂-Äquivalente in den Straßen gespeichert werden, was die durch den Straßenbau verursachten Emissionen um circa 450 t CO₂-Äquivalente übertreffen würde. [107] Bis 2037 könnte der Asphalt im Kanton Basel so als Senke für bis zu 14.000 t CO₂-Äquivalente dienen. [106]

7 Nutzung natürlicher Ressourcen

Um am Leben zu bleiben, muss der Mensch natürliche Ressourcen nutzen. Zu diesen gehören Land, Wasser, Rohstoffe sowie Energieträger. Wie sie verwendet und wie viele verbraucht werden, hat sich aber im Laufe der Zeit verändert. Wurde Land früher großteils für den Anbau von Lebensmitteln bewirtschaftet, versiegeln wir heute immer Boden durch Straßen und andere Bauten, wie in Kapitel 5 bereits erläutert wurde. Durch den steigenden Konsum werden immer mehr Rohstoffe für die Herstellung diverser Produkte abgebaut, was deren natürliches Vorkommen reduziert und Energie verbraucht, die zu einem großen Teil durch die Verbrennung von Energieträgern erzeugt wird. Diese Vorgänge vermindern nicht nur die natürlichen Bestände, die zukünftigen Generationen zur Verfügung stehen, sondern wirken sich auch unmittelbar aus. Neben Effekten, wie jenem der urbanen Hitzeinseln, der in Kapitel 4 beschrieben wurde, kommt es zu Veränderungen des Klimas durch den Treibhausgaseffekt, was weitreichende Folgen hat, wie in Kapitel 6.1.4 aufgezeigt wurde. Die effiziente Nutzung von Ressourcen und Umweltschutz gehen also Hand in Hand. [108]

Zur Quantifizierung können der Material-Fußabdruck und der CO₂-Fußabdruck herangezogen werden. Die Bauindustrie zählte dabei im Jahr 2015 zusammen mit der Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln und dem Gesundheits- und Sozialwesen zu den Sektoren mit den jeweils höchsten Anteilen. 14 % des österreichischen Material-Fußabdrucks und 8 % des CO₂-Fußabdrucks waren auf den Bausektor zurückzuführen. [108] Da der Verbrauch von fossilen Brennstoffen eng mit dem Ausstoß von CO₂ verbunden ist, wurde dieser bereits in Kapitel 6.1.4 besprochen. Das folgende Kapitel widmet sich daher vorrangig den Maßnahmen zur Verminderung des Materialverbrauchs.

Im Jahr 2018 wurden in Österreich 95,4 Millionen Tonnen an nicht-metallischen Mineralstoffen verbraucht – über 50 % des österreichischen Materialverbrauchs fallen auf diese zurück. 97 % davon waren Sand, Kies, Schotter, Ton und Kalkstein, die in großen Mengen im Bausektor eingesetzt werden. Etwa 50 % der im Bau verwendeten Rohstoffe werden dabei für den Erhalt bestehender Infrastruktur und Bauten eingesetzt, der Rest dient dem Neubau, wo sie als weiterer Bestand oft Jahrzehnte gebunden werden. Um den immer wachsenden Bestand zu erhalten, werden also immer mehr Baurohstoffe gebraucht. Jedoch offenbarte sich schon im Jahr 2014 global eine zunehmende Knappheit an Sand. Zwar stehen nicht-metallischen Mineralstoffe theoretisch überall auf der Welt zur Verfügung, ihr Abbau und Transport ist jedoch ökologisch problematisch. Des Weiteren sind die geeigneten Flächen teilweise stark umkämpft – verschiedenen Flächennutzungsarten, wie die Landwirtschaft oder Schutzgebiete, konkurrieren mit der bergbaulichen Nutzung. Zur Reduktion des Umwelteinflusses des Baugewerbes rückt daher die Kreislaufwirtschaft immer mehr in den Fokus. Wichtige Aspekte sind dabei die Verwendung von nachhaltigen Produkten sowie die Vermeidung von Abfall entlang der gesamten Wertschöpfungskette durch die Wiederverwendung rezyklierbarer Materialien. So soll der Materialbestand stabilisiert und die Deponierung vermieden werden. [108] Eine vollständige Kreislaufwirtschaft zu erreichen ist im Bausektor jedoch schwierig. Bauwerke weisen lange Lebensdauern auf, weshalb die Rohstoffe viele Jahre im Bestand gebunden sind. Der jährliche Abbruch deckt daher die für den Erhalt und Neubau erforderlichen Baustoffmengen nicht ab. Außerdem weichen die Eigenschaften oder Zusammensetzungen des gewonnenen Materials oft von den heute geforderten ab, was es für die Wiederverwendung ungeeignet macht. [108]

Dennoch ist das Recyclingpotential in der Baubranche durch die hohen Abfallmengen groß. Im Jahr 2021 fielen beispielsweise etwa 12,5 Millionen Tonnen mineralische Bau- und Abbruchabfälle an, wobei Aushubmaterial und gefährliche Abfälle hier nicht mitgezählt wurden. 8,9 Millionen Tonnen

davon wurden in Behandlungsanlagen gemeinsam mit geringen Mengen Aushubmaterial zu etwa 9 Millionen Tonnen Recycling-Baustoffen verarbeitet. Weiters wurden knapp 500.000 t bei der Herstellung von Zement, Beton oder Asphaltmischgut stofflich verwertet. Etwa 1,1 Millionen Tonnen der Abbruch- und Bauabfälle wurden deponiert. Der Rest wurde entweder thermisch verwertet oder exportiert. [109] Die prozentuellen Anteile sind in Abbildung 7.1 dargestellt.

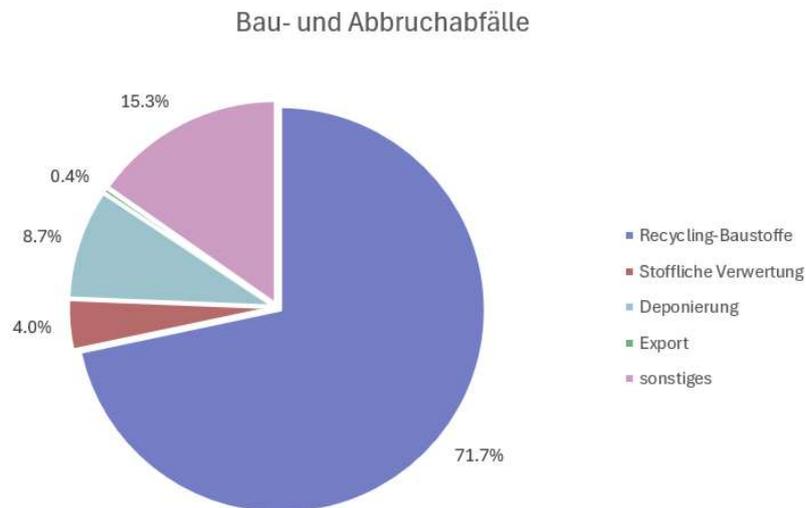


Abbildung 7.1: Verwendung bzw. Verbleib von Bau- und Abbruchabfällen im Jahr 2021. Eigene Darstellung unter Verwendung von [109]

Darüber hinaus fielen über 46 Millionen Tonnen Aushubmaterial an. Zu dieser Gruppe zählen unter anderem nicht verunreinigtes Bodenaushubmaterial, Tunnelausbruchmaterial, technisches Schüttmaterial, beispielsweise aus Tragschichten oder Frostkoffern, strukturell oder chemisch verunreinigtes Aushubmaterial oder Rückstände spezieller Bauverfahren, wie Bohrschlämme oder Rücklaufsuspensionen. Sie alle bestehen vorwiegend aus mineralischen Stoffen, wie Kies oder Schluff, wobei die genaue Zusammensetzung von verschiedenen Faktoren, darunter der Bodenart, der Aushubtiefe oder etwaigen Verschmutzungen, abhängt. Mit der Zusammensetzung variieren auch die Möglichkeiten der Wiederverwendung. Beispielsweise kann nicht verunreinigtes Material mit wenig organischen Bestandteilen und geeigneter Korngröße zu Recycling-Baustoffen verarbeitet werden. Nicht verunreinigtes Material mit vielen organischen Anteilen eignet sich hingegen besser für den Einsatz bei der Bodenverbesserung. Verunreinigtes Aushubmaterial muss deponiert oder zuerst behandelt werden. Von den mehr als 46 Millionen erfassten Tonnen Aushubmaterial wurden im Jahr 2021 etwa 4,6 Millionen Tonnen in Behandlungsanlagen für mineralische Bau- und Abbruchabfälle verarbeitet, knapp 1,4 Millionen Tonnen zur Rekultivierung und circa 7,6 Millionen Tonnen zur Untergrundverfüllung eingesetzt. 810.000 t wurden in Ziegelwerken oder Betonmischanlagen recycelt. Wie in Abbildung 7.2 zu erkennen ist, wurden etwa 58 % des Aushubmaterials, also circa 26,5 Millionen Tonnen, deponiert. [109]

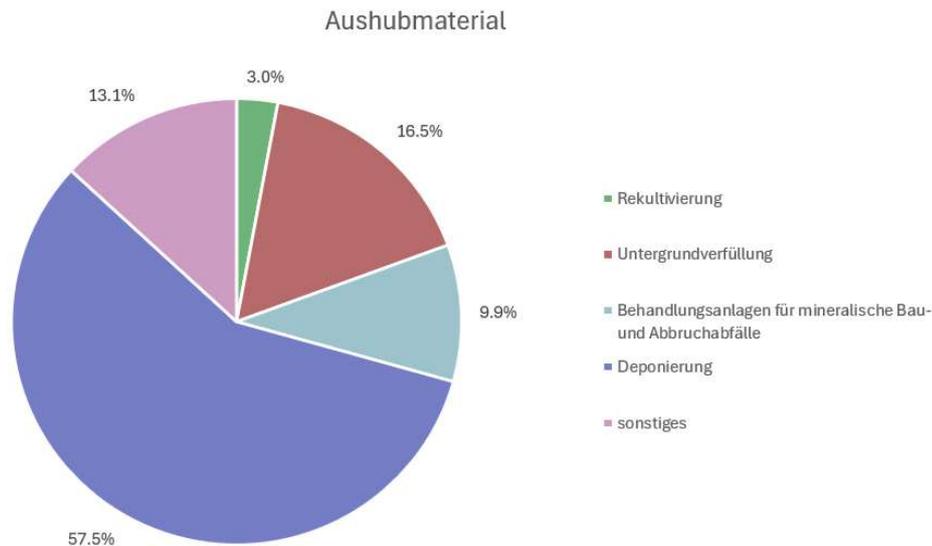


Abbildung 7.2: Verwendung bzw. Verbleib des im Jahr 2021 in Österreich angefallenen Aushubmaterials. Eigene Darstellung unter Verwendung von [109]

Wie hoch die Recyclingquote ist, ist also stark vom betrachteten Baustoff abhängig. Für Asphalt und Beton liegt sie aktuell bei etwa 95 %, für Mauerwerk bei etwa 70 %. Problematisch ist, wie die genannten Zahlen zeigen, die Gruppe des Bodenaushubs – sie weist nicht nur einen besonders hohen Anteil am Gesamtabfall auf, sondern zeichnete sich stets auch durch eine auffallend hohe Deponiequote von etwa 80 % aus. Dieses hohe Potential soll in Zukunft durch Anpassung der gesetzlichen Rahmenbedingungen besser genutzt werden, wie in Kapitel 7.1 erklärt wird. [110]

Mit dem Ziel, die Recyclingquote für alle Baurestmassen zu erhöhen, beschäftigt sich auch der am 20. August 2024 vorgestellte Klimaplan [99] des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. Zukünftig sollen neue Deponieverbote und innovative Forschungsprojekte die Kreislaufwirtschaft weiter fördern und der Materialverbrauch so bis 2030 um 25 % sinken. [99] Wie die Abfallwirtschaft und das Recycling von Baustoffen in Österreich aktuell geregelt sind, wird im Folgenden erläutert.

7.1 Recycling im Straßenbau – rechtlicher Rahmen

Seit 2016 gilt in Österreich die aktuelle Fassung der Recycling-Baustoffverordnung RBV [111]. Ihr Ziel ist die Förderung des Recyclings von Abfällen, die bei Bau- oder Abbrucharbeiten anfallen. Dies soll durch die Sicherstellung einer hohen Qualität dieser Abfallstoffe erreicht werden, was ihre Eignung für die Wiederverwertung verbessert. Beim Abbruch müssen daher laut Verordnung gewisse Vorgaben erfüllt werden. Dazu gehören ein verwertungsorientierter Rückbau und die Durchführung einer Schadstoff- und Störstofferkundung. Darüber hinaus werden Ansprüche an die Qualität der herstellbaren Recycling-Baustoffe gestellt und mögliche Einsatzgebiete genannt. [112]

Laut Recycling-Baustoffverordnung muss bei Abbrüchen, bei denen mehr als 750 t Abfälle anfallen, eine Schad- und Störstofferkundung durchgeführt werden. Linienbauwerke und Verkehrsflächen sind von dieser Verpflichtung ausgenommen. In den zugehörigen Erläuterungen wird dennoch darauf hingewiesen, dass es sinnvoll ist, das Aufbruchmaterial auf Verunreinigungen zu prüfen. Besonders relevant sind hier polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK, vgl. Kapitel 6.1.3) aus alten Teerschichten. Alternativ kann auch vor Beginn der Aufbruch- oder Fräsarbeiten eine analytische

Untersuchung zur Sicherung der Qualität durchgeführt werden. Des Weiteren besteht beim Abbruch eine Trennpflicht für anfallende Abfälle. Gefährliche müssen von ungefährlichen Stoffen und verschiedene Stoffgruppen voneinander getrennt werden. Darunter fallen unter anderem Bodenaushubmaterial, mineralische Abfälle, Ausbauphase und Metallabfälle. Die Trennpflicht gilt nicht, wenn die Abfälle ungefährlich sind und gemeinsam zur Herstellung von Recycling-Baustoffen genutzt werden können. Ein Beispiel ist die Produktion von rezykliertem Mischgranulat aus gebrochenem Asphalt- und Betonabbruch. Im Zuge der Arbeiten muss stets ein besonderer Fokus auf eine ausführliche Dokumentation aller Schritte gelegt werden. [113]

Die Recycling-Baustoffverordnung gibt in ihrem Anhang 1 Abfallarten an, die für die Herstellung von Recycling-Baustoffen zulässig sind. Hierzu zählen unter anderem Straßenaufbruch, Bitumen, Asphalt sowie Bodenaushub, wobei gewisse Spezifizierungen getroffen werden. Auf eine Kontamination oder Verunreinigung ist zu achten. Problematisch können beispielsweise PAK aus teerhaltigen Schichten sein. Die Verordnung enthält auch Anweisungen an den Hersteller von Recycling-Baustoffen. Dazu gehören eine visuelle Eingangskontrolle der Abfälle vor Verwendung sowie die Einhaltung gewisser Qualitätsanforderungen und Maßnahmen zu deren Sicherung, wie Deklarationsprüfungen und die werkseigene Produktionskontrolle. Für hydraulisch oder bituminös gebundene Deck- oder Tragschichten kann die Qualitätssicherung beispielsweise durch eine analytische Untersuchung von vor Arbeitsbeginn entnommenen Bohrkernen oder Fräsproben passieren, wobei gewisse Vorgaben eingehalten werden müssen. Die Qualitätsanforderungen, darunter einzuhaltende Grenzwerte, sowie zulässige Einsatzbereiche und etwaige Verwendungsverbote sind abhängig von der Qualitätsklasse des Recycling-Baustoffs. Die Verordnung unterscheidet acht solcher Klassen. [111] Kann ein Recycling-Baustoff der Qualitätsklasse U-A zugeordnet werden, tritt bei Übergabe an Dritte das Abfallende in Kraft – er darf als Produkt gehandelt werden und verliert die Abfalleigenschaft. [113] Auch Recycling-Baustoffe anderer Qualitätsklasse verlieren ihre Abfalleigenschaft, jedoch erst beim zulässigen Einsatz oder Einbau. [114]

Abschnitt 5 der Recycling-Baustoffverordnung beschäftigt sich speziell mit Asphaltmischgut. Für die Herstellung dürfen die Qualitätsklassen U-A, U-B und U-E sowie die Qualitätsklassen B-B, B-C, B-D und D verwendet werden, wobei sich die Qualitätsklassen B-B, B-C, B-D und D ausschließlich für die Asphaltmischgutherstellung eignen. [113] Bei ihrer Verwendung können die Qualitätsklassen Asphaltmischgut B-B, B-D und D erreicht werden, für die die Verordnung zulässige Einsatzbereiche und Verwendungsverbote festlegt. [111]

Dies ist besonders relevant, da mit der Änderung der Deponieverordnung DVO am 1. Jänner 2024 laut § 7 Z. 14 DepVO die Deponierung von mineralischen Baurestmassen, genauer Straßenaufbruch (SN 31410), Bitumen, Asphalt (SN 54912), Bodenaushub (SN 31411 34 und SN 31411 35) und Betonabbruch (SN 31427 und SN 31427 17), verboten wurde. Ausgenommen sind offensichtlich verunreinigte Stoffe oder solche, die die Qualitätsanforderungen für Inertabfalldeponien nicht einhalten. [115] Die SN-Nummern beziehen sich auf die Abfallverzeichnisverordnung 2020. Straßenaufbruch umfasst eine Mischung aus Asphaltaufbruch, Beton sowie Tragschichtmaterialien. [109]

7.2 Asphaltrecycling

Die Wiederverwendung von Asphaltbruch hat bereits eine lange Geschichte. Schon in den 1930er Jahren wurde Ausbauphase vereinzelt bei der Errichtung neuer Straßen wiederverwertet. Eine gezielte Entwicklung der Recyclingstrategien startete aber erst in den 1970er Jahren. Im Jahr 1987 lag die Recyclingquote in Deutschland bei etwa 40 % - 3 Millionen Tonnen der circa 7,5 Millionen Tonnen

Ausbauasphalt wurden wiederverwendet. [92] Im Jahr 2021 lag die österreichische Recyclingquote bereits bei etwa 95 %. [109]

Asphalt weist grundsätzlich für das Recycling günstige Eigenschaften auf. Bitumen kann als thermoviskoses Bindemittel anders als Zement durch Hitze reaktiviert werden, sodass das gewonnene Asphaltgranulat nach einer Aufbereitung ein weiteres Mal eingebaut und verdichtet werden kann. Meist wird das rezyklierte Mischgut dafür mit frischem Asphaltmischgut vermengt. Problematisch kann die hohe Beanspruchung der Gesteinskörnung beim Ausbau sein, die gegebenenfalls zur Kornzerkleinerung führt. Des Weiteren können die Alterung des Bitumens über die Liegedauer und der damit einhergehende Verlust der Duktilität die Wiederverwendbarkeit beeinträchtigen. Die im Zuge des Recyclingprozesses erforderliche Erhitzung lässt das Bindemittel weiter altern. Zur Kompensation dieser Degradation können Rejuvenatoren, also „Verjüngungsmittel“, auf Pflanzen- oder Mineralölbasis zugegeben werden, die der Versprödung entgegenwirken. [92]

Ausbauasphalt wird je nach Art der Gewinnung in Fräsgut und Aufbruchasphalt unterschieden. Beim Aufbrechen entstehen große Schollen, beim Fräsen feineres Granulat. Ein Vorteil des Fräsens liegt in der Möglichkeit des schichtenweisen Abtrags. Ein Straßenquerschnitt besteht aus mehreren Schichten, die sich in ihrer Aufgabe und ihrem Aufbau unterscheiden, woraus unterschiedliche Anforderungen an die Gesteinskörnung und das Mischgut resultieren. Durch einen getrennten Fräsabtrag wird eine hochwertige Wiederverwendung begünstigt. [92]

Die Aufbereitung des Straßenaufbruchs passiert in Behandlungsanlagen für mineralische Bau- und Abbruchabfälle. Hier werden Abfälle, wie Straßenaufbruch und Betonabbruch, technisch konditioniert, also für die weitere Nutzung vorbereitet. Neben der Zerkleinerung und Siebung ist auch die Entfrachtung von eventuell vorhandenen Schad- und Störstoffen eine wichtige Aufgabe. Ziel ist die Herstellung von qualitätsgesicherten Recycling-Baustoffen. Das entstehende Recyclingmaterial, darunter Asphaltgranulat, kann dann als Zuschlagstoff für die Baustoffproduktion oder direkt als Baustoff, beispielsweise in Tragschichten, eingesetzt werden. [109]

Soll Asphaltgranulat bei der Mischgutherstellung rezykliert werden, müssen gewisse Eigenschaften bekannt sein. Dazu gehören die Bindemittelmenge und der Erweichungspunkt Ring und Kugel des enthaltenen Bitumens, die Korngrößenverteilung der Gesteinskörnung, der Wassergehalt, der Gehalt an eventuellen Fremdstoffen und die Umweltverträglichkeit, also die Qualitätsklasse. Wichtig ist, bei der Sieblinie zwischen der Korn- und der Stückgrößenverteilung des Asphaltgranulats zu unterscheiden, wobei als Stück ein Agglomerat aus Gesteinskörnung und verklebendem Bindemittel bezeichnet wird. [92] Aus diesen Werten ergibt sich auch die Größenbezeichnung des Granulats U RA d/D, wobei U für die maximale Stückgröße, RA für rezykliertes Asphaltgranulat mit einem Asphaltanteil von mindestens 80 M.-% und d bzw. D für die Siebgrößen stehen. [116] Die ÖNORM EN 13043 [117] und die ÖNORM B 3130 [118] enthalten Anforderungen an das Asphaltgranulat. Jene an das Asphaltmischgut sind in ÖNORM EN 13108-8 [116] und ÖNORM B 3580-1 [119] oder anderen technischen Regelwerken, wie dem „Merkblatt für die Wiederverwendung von Asphalt“ [120] des FGSV, zu finden.

Asphaltgranulat kann in verschiedener Weise wiederverwendet werden. Einerseits eignet es sich für die Herstellung von Asphaltmischgut, andererseits kann es für Tragschichten ohne Bindemittel oder mit hydraulischen Bindemitteln verwendet werden. Ein Downcycling, also die Verwendung in einer niederrangigeren Schicht, sollte jedoch vermieden werden – beispielsweise sollte Deckschichtmaterial wieder für Deckschichten und nicht für Tragschichten verwendet werden. [120]

7.2.1 Verwertungsmethoden

Grob können zwei Verwertungsmethoden für Ausbauasphalt unterschieden werden – einerseits besteht die Möglichkeit der Wiederverwertung vor Ort („in place“), andererseits die der Verarbeitung in einer Asphaltmischanlage („in plant“). [92]

Das Recycling „in place“ beschränkt sich auf Instandsetzungsarbeiten, die der Wiederherstellung der Deckschicht dienen. Das abgefräste Material wird dabei direkt vor Ort wieder eingebaut, wobei es mit frischem Mischgut vermengt werden kann. Eine wesentliche Verbesserung der Asphaltqualität ist dabei nicht möglich – mit diesem Verfahren können Verformungen der Oberfläche, wie Spurrinnen, ausgebessert werden, die mechanischen Eigenschaften werden jedoch nicht maßgebend verändert. Daher gelten eine ausreichende Homogenität und eine hinreichende Qualität des Bitumens als Voraussetzungen. Es können drei Verfahren unterschieden werden – das Reshape-, das Regrip- und das Remix-Verfahren. Die Reshape-Behandlung dient der Wiederherstellung der Fahrbahnoberfläche ohne Zugabe von zusätzlichem Mischgut. Die Fahrbahnoberfläche wird zuerst aufgeheizt, dann aufgelockert, erneut verteilt und wieder verdichtet. Wenn kaum verschleißbedingter Materialverlust vorliegt, können so Unebenheiten im Querprofil, wie Spurrinnen, ausgebessert werden. Das Regrip-Verfahren ähnelt dem Reshaping und verbessert zusätzlich zur Ebenheit auch die Griffigkeit der Fahrbahn. Dafür wird im Anschluss Splitt auf die noch heiße Deckschicht aufgebracht und eingewalzt. Im Zuge des Remix-Verfahrens wird der Ausbauasphalt vor dem Wiedereinbau mit frischem Mischgut ergänzt, um die Qualität der Deckschicht zu verbessern und eventuelle Materialverluste zu kompensieren. Es besteht weiters die Möglichkeit des Repave, also der „heiß auf heiß“-Überbauung mit einer neuen Asphaltenschicht. [92]

Wird nicht nur die Deckschicht der Straße erneuert oder kann der gewonnene Ausbauasphalt aus wirtschaftlichen oder technischen Gründen nicht vor Ort wiederverwendet werden, erfolgt eine Rückführung in eine Recycling- bzw. Asphaltmischanlage („in plant“). Besonders wirtschaftlich und nachhaltig ist das niveaugleiche Recycling, also die hochwertige Wiederverwendung des gewonnenen Materials in einer Schicht, die der ursprünglichen in Funktion und Rezeptur gleicht. So kann Asphaltgranulat aus Deckschichten grundsätzlich in Tragschichten verwendet werden, das volle Potential wird dabei jedoch nicht ausgeschöpft. Die Anforderungen an Asphaltmischgut sind einheitlich geregelt – auch bei der Zugabe von Ausbauasphalt müssen diese Qualitätsansprüche eingehalten werden. [92] Sie sind in der RVS 08.97.05 [121] und der Normenreihe ÖNORM B 3580-x [119] zu finden. Wie viel Asphaltgranulat zugegeben werden kann, hängt von den technischen Möglichkeiten der Asphaltmischanlage und der Homogenität des Materials ab. Grundsätzlich werden zwei Zugabearten unterschieden – die Kalt- und die Warmzugabe. Bei der Kaltzugabe ist ein Asphaltgranulatanteil von etwa 30 M.-% bei chargenweiser und von 40 M.-% bei kontinuierlicher Zugabe zu erreichen. Wird das Granulat zuerst in einer eigenen Paralleltrommel auf 130 °C erhitzt und getrocknet, können größere Mengen beigefügt werden. Bei der Warmzugabe ist daher ein Recyclinganteil von über 80 M.-% erreichbar. [92] Es ist zu beachten, dass bei sehr hohen Zugabemengen die Mischguteigenschaften vorwiegend durch das Recyclingmaterial bestimmt werden und nur begrenzt beeinflussbar sind. Das verwendete Asphaltgranulat muss in diesen Fällen mit besonderer Vorsicht gewählt und auf den späteren Verwendungszweck angepasst werden. [120] Die Qualität des Mischguts kann noch etwas durch die Konsistenz des neu zugegebenen Bindemittels und die Nachmischzeit beeinflusst werden. Verhärtetes Bitumen kann durch die Zugabe von weichen Bindemitteln kompensiert werden und umgekehrt. Die resultierenden mechanischen Eigenschaften sind stark von der Nachmischzeit abhängig. Ist diese lang genug, kommt es zu einem vollständigen

Aufschluss des Asphaltgranulats, wodurch sowohl das alte als auch das neue Bindemittel aktiviert werden. Bei guter Abstimmung der einzelnen Faktoren – Granulatgewinnung, Asphaltgranulats-eigenschaften, Mischgutrezeptur und Mischtechnologie – ist eine niveaugleiche Wiederverwendung ohne Beeinträchtigung der mechanischen Eigenschaften durchaus möglich. [92]

Für Schichten im Straßenquerschnitt, die Asphaltgranulat enthalten, gelten dieselben Anforderungen wie für Schichten ohne Recyclingmaterial. Bei der Bemessung ist daher die RVS 03.08.63 [62] und zugehörige Normen und Richtlinien zu beachten.

7.3 Betonrecycling

Das Recycling von Beton begann wie das systematische Asphaltrecycling in den 1970er Jahren. Betonbruch aus Verkehrsflächen und Hoch- sowie Ingenieurbauten wurde damals vorrangig im Straßenbau wiederverwendet – ursprünglich nur für Tragschichten, später auch für Deckschichten. Beton eignet sich sehr gut für die Wiederverwertung und weist ein breites Spektrum von späteren Einsatzmöglichkeiten auf. Neben dem Einsatz im Erd- und Straßenbau, eignet sich aufbereiteter Betonbruch auch als Zuschlagstoff in der Beton- oder Asphaltherstellung. [92] Daher wurden von den knapp 4,2 Millionen Tonnen Betonabbruch aus Konstruktions- und Fertigteilen, Fahrbahnen und Estrich im Jahr 2021 etwa 3,3 Millionen Tonnen in Behandlungsanlagen für mineralische Bau- und Abbruchabfälle verwertet und nur 13.000 t deponiert. [109]

Im Gegensatz zu natürlicher Gesteinskörnung sind Betonrezyklate nicht inert, da der alte Zement, genauer die Bestandteile, wie Kalziumhydroxid, Kalziumsilikathydrate oder nicht hydratisierte Zementreste, noch ein gewisses Reaktionspotential aufweist. Begünstigt werden daraus Effekte, wie eine Verfestigung bei der Lagerung, durch eine hohe Porosität und große spezifische Oberfläche des Betonbruchs. Darüber hinaus kommt es bei Rezyklaten, wie bei herkömmlichem Beton auch, zur Ettringitbildung, wenn sie mit suflathaltigem Wasser in Berührung kommen. Das Sulfat kann aus im Betonbruch vorhandenen Gipspartikeln stammen oder durch Wasser eingeschwemmt werden. Auch wenn die Reaktion meist schon am Lagerplatz beginnt, ist sie durch den hohen Hohlraumanteil, der die Volumenvergrößerung aufnimmt, hier noch nicht erkennbar. Im verbauten Zustand zeichnet sich jedoch ein anderes Bild ab. Durch die geforderte Verdichtung ist der Porenanteil so gering, dass er die Verformungen nicht aufnehmen kann. Folgen der Ettringitbildung in Tragschichten können deshalb Hebungen und Aufwölbungen der Straßenoberfläche sein. [92]

Betonrezyklate werden durch verschiedene Kenngrößen charakterisiert. Neben der grundsätzlichen Zusammensetzung, also dem Vorhandensein von Asphalt, Ziegel oder anderen Fremdstoffen, spielen granulometrische und physikalische Parameter eine wichtige Rolle. Die Korngrößenverteilung kann bei der Aufbereitung durch das Zerkleinern, Dosieren und Mischen gut eingestellt und den jeweiligen Anforderungen angepasst werden. Das erzeugte Granulat weist dabei überwiegend eine kubische Kornform auf. Zu den wichtigen physikalischen Parametern zählen die Roh-, die Rein-, die Schütt- und die Proctordichte. Sie beeinflussen verschiedene andere wichtige Faktoren, wie das Wasseraufnahmevermögen, die Kornfestigkeit und den Widerstand gegen Frost-Tauwechselbeanspruchung. Diese Rezyklateigenschaften beeinflussen die Möglichkeiten der Verwertung, da verschiedene Einsatzgebiete des Recycling-Baustoffs unterschiedliche umwelt- und bautechnische Anforderungen stellen. So muss Material, das zur Künettenfüllung verwendet wird, geringe bautechnische, aber hohe umwelttechnische Kriterien erfüllen, da etwaige Schadstoffe ausgewaschen werden könnten. Ist das Granulat fest im Zementstein gebunden und die Schadstoffelution damit verhindert, überwiegen bautechnische Anforderungen. [92] Während die umwelttechnischen

Anforderungen durch die Qualitätsklassen geregelt sind, kommen im Hinblick auf die bautechnischen Voraussetzungen Güteklassen zur Anwendung. Zu beachten ist weiters, dass rezyklierte Gesteinskörnung auch in untergeordneter Menge, also mit einem Anteil von < 50 %, natürliche Gesteinskörnung enthalten darf. [114]

Betonbruch kann im Erdbau, im Straßenbau sowie in der Betonherstellung wiederverwertet werden, weshalb grundsätzlich in jeder Schicht eines Straßenquerschnitts, von Unterbau bis zur Deckschicht, Recycling-Baustoffe gefunden werden können. Die wichtigsten Einsatzbereiche sind dabei Frostschutz- und Tragschichten ohne Bindemittel. Bestandteile, die Nachteile für den Einbau oder den späteren Betrieb haben können, dürfen nur eingeschränkt vorhanden sein. Beispielsweise ist der Asphaltgehalt beim Einsatz in ungebundenen Tragschichten limitiert, da das enthaltene Bitumen die Verdichtbarkeit beeinträchtigen und verkehrsbedingte Verformung bei sommerlichen Temperaturen begünstigen kann. Des Weiteren werden Anforderungen an die Korngrößenverteilung, den Feinanteil, die Kornform und die mechanische Belastbarkeit gestellt, wobei die Frostbeanspruchung eine wichtige Rolle spielt. [92]

Bei der Wiederverwertung von aufbereitetem Betonbruch als rezyklierte Gesteinskörnung in der Betonherstellung sind die ÖNORM EN 12620 [122] sowie die ÖNORM B 3131 [123] zu beachten. Wieder ist die Eignung von den Güte- und Qualitätsklassen abhängig, da das Recyclingmaterial die Verarbeitungs- und Gebrauchseigenschaften sowie die Dauerhaftigkeit und Tragfähigkeit des Endprodukts nicht beeinträchtigen darf. Im Straßenbau kann Recycling-Gesteinskörnung in Deckschichten oder Fertigteil-Betonpflastersteinen gefunden werden. Dieser hochwertigen Verwertungsform kommt mengenmäßig aber nur ein geringer Teil zu. [92]

Neben der Aufbereitung in stationären Anlagen besteht die Möglichkeit der „in place“-Verwertung, die vor allem bei der Erneuerung von Autobahnen mit Betonfahrbahn zur Anwendung kommt. [92] Der Betonaufbruch wird dabei vor Ort in einer mobilen Aufbereitungsanlage zerkleinert, gesiebt und in die einzelnen Fraktionen getrennt, um anschließend direkt auf der Baustelle wiederverwendet zu werden. Ein geringer Asphaltanteil von bis zu 20 % stellt hierbei kein Problem dar, da die Eigenschaften des Recyclingbetons nicht nennenswert beeinflusst werden. Dennoch sollte ein sortenreiner Rückbau stets das oberste Ziel sein. [124] Besonders vorteilhaft sind bei dieser Verwertungsmethode die kurzen Transportwege, die einheitliche Qualität und die hohen Granulatmengen. Häufig wird aufbereiteter Betonbruch in Frostschutz- oder ungebundenen Tragschichten verwendet, wo er den jeweiligen Anforderungen an die Gesteinskörnung gemäß ÖNORM EN 13242 [125], ÖNORM B 3132 [126] und ÖNORM B 3140 [127] entsprechen muss. Das Material aus einem 10 km langen Aufbruch einer zweispurigen Richtungsfahrbahn reicht dann beispielsweise zur Herstellung von etwa 50.000 t Recycling-Baustoff, die wiederum zur Errichtung einer 0,25 m starken neuen Tragschicht verwendet werden können. [92] Im Sinne einer möglichst hochwertigen Wiederverwendung sollte dieses Downcycling jedoch zukünftig vermieden und Recyclingbeton aus Fahrbahndecken auch wieder im Oberbeton eingesetzt werden. Eine geeignete Bauweise für hochrangige Verkehrswege sieht dabei wie folgt aus: Auf einer zementstabilisierten oder ungebundenen Tragschicht wird eine Asphalttragschicht errichtet. Darüber kommt eine zweischichtige Betondecke zu liegen, deren Unterbeton Recyclinggranulat enthält. Die verwendete rezyklierte Gesteinskörnung sollte eine Kornfraktion > 4 mm aufweisen, wobei die genauen Anforderungen in RVS 08.17.02 [128] zu finden sind. Zu guter Letzt folgt frisch auf frisch der dünne Oberbeton mit hochwertiger und lärmarmen Waschbetonoberfläche. Der Einbau kann wie bei herkömmlichen Betonstraßen mit Gleitschalungsfertigern durchgeführt werden. Die Wiederverwendung des rezyklierten Deckschichtmaterials zur

Herstellung der neuen Fahrbahnoberfläche ist nach dem aktuellen Stand der Technik nicht zu empfehlen, da die hohen Anforderungen, die heute an eine Straßenoberfläche gestellt werden, nicht zuverlässig erfüllt werden können. [124]

7.4 Recycling von Aushubmaterial

Aushubmaterial entsteht im Bauwesen an verschiedenen Stellen – vom Ausheben einer Baugrube bis zum Bau eines Tunnels. Aber auch Material aus natürlichen Massenbewegungen, technisches Schüttmaterial oder Abfälle spezieller Bauverfahren, wie Rücklauf Suspensionen und Bohrschlämme, fallen in diese Gruppe, die im Jahr 2021 mit 46 Millionen Tonnen einen erheblichen Beitrag zum österreichischen Abfallaufkommen geleistet hat. [109]

Aushubmaterial besteht vorrangig aus mineralischen Bestandteilen. Der Anteil an organischen Substanzen und bodenfremden Substanzen variiert aber stark und beeinflusst die Möglichkeiten der Wiederverwertung. Nicht verunreinigtes Material mit geringen humosen Anteilen kann als rezyklierte Gesteinskörnung eingesetzt werden, während sich solches mit hohen organischen Anteilen zur Herstellung einer Rekultivierungsschicht eignet. Durch Altlasten, Betriebsstörungen, Unfälle oder Katastrophen verunreinigtes Aushubmaterial muss hingegen aufwendig behandelt oder entsprechend deponiert werden, wobei anzumerken ist, dass in der Vergangenheit aufgrund der großen anfallenden Mengen auch ein beträchtlicher Anteil des nicht kontaminierten Materials deponiert wurde. Aushubmaterial zählt nicht immer als Abfall, da es gewisse gesetzliche Ausnahmen gibt. Wird beispielsweise Bodenmaterial direkt am Anfallort wiederverwendet oder werden Sedimente zur Gewässerbewirtschaftung nur umgelagert, müssen diese nicht als Abfall registriert werden. Wichtig ist dabei, dass dies stets nur für nicht kontaminiertes und umwelttechnisch unbedenkliches Material gilt. Daraus folgt, dass das tatsächliche Aushubaufkommen noch größer als in der Bilanzierung erfasst ist. Diese Gruppe birgt daher ein hohes Recyclingpotential, das zukünftig zur Ressourcenschonung genutzt werden soll. [109]

Besonders große Mengen fallen beim Straßenneubau an. Je nach Geländeform und Rang der Straße beträgt das durchschnittliche Aushubaufkommen zwischen 1,8 t/lfm bei Radwegen und 41,2 t/lfm bei Autobahnen. Aus Kosten- und Umweltgründen sollte ein möglichst großer Anteil des Aushubs vor Ort zum Massenausgleich verwendet werden. Weitere wichtige Quellen des Aushubs sind der Hochbau, die Errichtung der Schieneninfrastruktur und der Wasserversorgung sowie der Tunnelbau. Insgesamt verursachten diese Baumaßnahmen jährlich etwa 70 Millionen Tonnen Gesamtaushub, von denen aber nur 40 % tatsächlich als Abfall anfallen, da ein großer Teil direkt vor Ort wiederverwendet wird. [129]

Wie erwähnt, sind die Verwertungsmöglichkeiten von der Qualität des Aushubmaterials abhängig, wobei als oberstes Ziel stets die Vermeidung jeder Gefährdung für Umwelt und Menschen gilt. Eine Behandlung des Aushubs dient daher nicht nur der technischen Konditionierung des Materials. Es sollen auch unerwünschte Bestandteile entfernt und etwaige Schadstoffe durch mikrobiologische oder thermische Verfahren unschädlich gemacht werden. So soll ein Schadstoffeintrag in Luft, Boden oder Wasser beim späteren Einsatz verhindert werden. Da die Gruppe des Aushubmaterials sehr umfassend ist, sind auch die Wiederverwendungsmöglichkeiten sehr vielfältig. Grundsätzlich lassen sich folgende Methoden unterscheiden: der Aushub kann als Rohstoff für die Industrie oder als Recycling-Baustoff für die weitere bautechnische Verwendung oder Verwertung dienen, zur Untergrundverfüllung oder Bodenverbesserung herangezogen werden oder zu künstlichen Erden weiterverarbeitet werden. [109]

Da das Spektrum also sehr breit ist, werden im Folgenden einige straßenbaulich interessante Aspekte erläutert.

Nicht verunreinigtes Bodenaushubmaterial kann zur Rekultivierung oder Verfüllung herangezogen werden, wobei die Anwendungsgebiete von den Qualitätsklassen A1, A2, A2-G und BA abhängen. Material der Klasse A1 darf weitestgehend uneingeschränkt, beispielsweise zur landwirtschaftlichen Rekultivierung oder Bewirtschaftung, eingesetzt werden. Jenes der Klasse A2 bzw. A2-G kann zur Untergrundverfüllung verwendet werden, wobei gewisse wasserrechtliche Einschränkungen bestehen. Die Klasse BA kennzeichnet Bodenaushubmaterial mit Hintergrundbelastung und ist nur in Absprache mit den zuständigen Behörden einzusetzen. [129]

Technisches Schüttmaterial, welches beispielsweise aus Frostkoffern oder Drainageschichten stammen kann, stellt anders als Bodenaushubmaterial keinen natürlich gewachsenen Boden dar und fällt bei Straßenerneuerungen in großer Menge an. Gilt es als nicht verunreinigt, darf es wieder als Baustoff eingesetzt werden, wobei eine Aufbereitung in einer Siebanlage zweckmäßig ist. [129]

Tunnelausbruchmaterial kann vielfältig wiederverwertet werden. Es eignet sich für den Einsatz als Gesteinskörnung in Beton oder Asphalt, für Tragschichten, Bahnschotter oder als Rohstoff für die Industrie. [129]

Aushubmaterial kann laut Recycling-Baustoffverordnung [111] zur Herstellung von Recycling-Baustoffen genutzt werden, wofür es in Behandlungsanlagen für Baurestmassen mechanisch aufbereitet werden muss. Jährlich landen etwa 2 Millionen Tonnen Aushubmaterial in solchen Anlagen, wo sie sortiert, gebrochen und gesiebt werden, um anschließend als Zuschlagstoff in der Recycling-Baustoffproduktion oder als Schüttungs- oder Unterbaumaterial verwertet zu werden. [129] Bei der Wiederverwertung sind die Anforderungen laut ÖNORM B 3141 [130] zu beachten.

8 Schlussfolgerungen

Abschließend sollen nun die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse nochmals zusammengefasst und ein Ausblick auf zukünftige Problemstellungen und Entwicklungen gegeben werden.

8.1 Zusammenfassung und Fazit

Die vorliegende Arbeit hat verschiedene ökologische Aspekte des Straßenbaus umfassend untersucht und mögliche Lösungsansätze diskutiert. Dabei zeigte sich, dass die nachhaltige Dimensionierung von Straßen ein komplexes Thema ist, da eine Vielzahl von technischen und ökologischen Faktoren aufeinander abgestimmt werden muss.

Offenporige Deckschichten fielen dabei besonders positiv auf, da sie bei einem Großteil der betrachteten Probleme Abhilfe verschaffen können. Durch ihre schallabsorbierenden Eigenschaften und thermischen Vorteile können sie sowohl zur Lärmreduktion als auch zur Vermeidung des städtischen Hitzeinseleffekts beitragen. Da Wasser in die Hohlräume einfließen kann, können sie außerdem den urbanen Wasserhaushalt positiv beeinflussen, die Kanalisation entlasten und Überflutungen vermeiden. Problematisch sind jedoch die geringe Dauerhaftigkeit und die kurze Lebensdauer dieser Bauweise. Poröse Straßenbeläge verstopfen schnell und können nur schwierig gereinigt werden, was zu hohen Kosten im Betrieb führt. Das Verschließen der Hohlräume führt weiters zum Verlust der genannten günstigen Eigenschaften, weswegen die Beläge zum Erhalt der Vorteile häufiger als herkömmliche Aufbauten ersetzt werden müssen. Durch ihr Wasseraufnahmevermögen sind sie auch anfälliger für Frostschäden, was sich ebenfalls negativ auf die Nutzungsdauer auswirkt. Die kurze Haltbarkeit relativiert also den ökologischen Nutzen, da die laufenden Wartungs- und Erneuerungsarbeiten Ressourcen und Energie verbrauchen. Ob offenporige Deckschichten einen ökologischen und monetären Vorteil bieten, ist deshalb im Einzelfall zu klären.

Die Flächenversiegelung durch Straßen war ein weiterer wichtiger Aspekt, der in dieser Arbeit behandelt wurde. Versickerungsfähige Bauweisen, wie offenporige Asphalt- oder Betondeckschichten oder wasserdurchlässige Pflasterdecken, können einen wichtigen Beitrag zur Entsiegelung leisten. Die Annäherung an den natürlichen Wasserkreislauf kann nicht nur bei Starkregenereignissen helfen, die Kanalisation zu entlasten und Überflutungen zu vermeiden, sondern fördert auch die Grundwasserneubildung. Die Verwendung offenporiger Deckschichten bringt jedoch wieder die schon besprochenen Probleme mit sich. Neben der Verstopfung und dem Verlust der Wasserführung wirkt sich vor allem die geringe Frostbeständigkeit negativ aus. Erneut muss die Eignung projektbezogen betrachtet werden. Der Einsatz von versickerungsfähigen Pflasterflächen in Bereichen geringer Verkehrslast ist in Österreich hingegen durchaus erprobt und zeichnet sich durch vielfach positive Erfahrungen aus.

Luftschadstoffe stellen global ein bedeutendes Gesundheits- und Umweltrisiko dar und entstehen im Straßenwesen an verschiedener Stelle – beispielsweise wird CO₂ vor allem beim Bau und Feinstaub vorrangig im Betrieb der Straße ausgestoßen. Die Maßnahmen zur Emissionsreduktion sind deshalb vielfältig. So kann die Feinstaubbelastung unmittelbar durch die Vermeidung von Spike-Reifen, einen effizienten Winterdienst und die regelmäßige Reinigung der Straße deutlich verringert werden. Wird eine Straße neu errichtet, sollten die künftigen Feinstaubemissionen bei der Deckschicht- und Mischgutwahl berücksichtigt werden. Flüchtige organische Verbindungen (VOC) und Kohlenstoffdioxid (CO₂) entstehen hingegen zum Großteil während der Materialproduktion und bei der Straßenerrichtung. Für Asphalt zeigte sich, dass die Temperatur in diesem Kontext den größten Einfluss

hat. Ein großes Potential liegt hier in der Verwendung von Niedrigtemperaturasphalten, die weniger VOC freisetzen und durch ihren geringeren Energieverbrauch CO₂ sparen. Besonders viel CO₂ wird im Bauwesen bei der Beton- bzw. Zementproduktion verursacht. Die Versuche, den Umwelteinfluss zu verringern, reichen von der tatsächlichen Emissionsreduktion durch Ersatz des Klinkers hin zur Speicherung des entstandenen CO₂ mittels „Carbon Capture Utilization and Storage“ (CCUS).

Große Fortschritte gibt es aktuell im Bereich des Recyclings. Die Wiederverwertung von Beton und Asphalt ist eine effektive Methode, um den Primärrohstoffbedarf zu reduzieren und gleichzeitig die Abfallmenge zu minimieren. Das Deponieverbot für mineralische Baurestmassen war ein wichtiger Schritt in eine nachhaltige Zukunft und wird die im Straßenbau aktuell schon hohe Recyclingquote noch weiter erhöhen. Technisch ist das Baustoffrecycling gut umsetzbar, wobei noch Lösungen entwickelt werden müssen, die ein hochwertiges, niveaugleiches Recycling garantieren. Aufholbedarf gibt es hingegen im Bereich der Aushubmaterialien. Hier muss die Kapazität an die großen anfallenden Mengen angepasst werden, um das gesamte Potenzial ausnutzen zu können.

Alles in allem zeigt die Arbeit, dass es bereits eine Vielzahl von technischen Lösungen für die ökologischen Herausforderungen im Straßenbau gibt. Durch ihre Wechselwirkungen, beispielsweise zwischen Porosität und Dauerhaftigkeit, werfen sie jedoch Zielkonflikte auf, die im konkreten Einzelfall abgewogen und geklärt werden müssen. Eine ganzheitliche Planung ist daher genauso wichtig wie technologische Neuerungen, um den ökologischen Fußabdruck des Straßenwesens nachhaltig zu reduzieren.

8.2 Ausblick

Die Zukunft des nachhaltigen Straßenbaus beruht auf zwei Säulen – zum einen ist die Weiterentwicklung technologischer Lösungen unerlässlich, zum anderen müssen bestehende Materialien und Bauweisen sinnvoll eingesetzt werden. Ein wichtiges Ziel sollte die Erhöhung der Belastbarkeit und Dauerhaftigkeit durchlässiger bzw. offenporiger Baustoffe sein, um den ökologischen Vorteil dieser Bauweise voll nutzen zu können.

Großes Potenzial liegt auch im Ausbau des Baustoffrecyclings. Einerseits müssen die Verwertungsmethoden für Beton und Asphalt verbessert werden, um eine qualitativ hochwertige, niveaugleiche Wiederverwendung zu ermöglichen und Downcycling zu vermeiden. Andererseits müssen die bestehenden Kapazitäten rasch an die großen Aushubmengen angepasst werden. Langfristig sollte eine Recyclingquote von 100 % und ein Up- oder zumindest echtes Recycling das Ziel sein.

Wenn auch in dieser Arbeit nur kurz erwähnt, stellt das Schwammstadt-Prinzip einen vielversprechenden Ansatz dar. Der großflächige Ausbau dieses Konzepts in urbanen Gebieten würde sich positiv auf das Stadtklima und den Wasserhaushalt auswirken, ohne die Nachteile der offenporigen Bauweise mit sich zu ziehen.

Abschließend ist zu sagen, dass die ökologische Dimensionierung von Straßen ein wichtiges Forschungsthema ist, das zukünftig noch weiter an Bedeutung gewinnen wird. Weitere Forschung sollte sich neben der Entwicklung neuer Materialien und Bauweisen vor allem auf deren ganzheitliche Einsetzbarkeit fokussieren, wobei ein besonderes Augenmerk auf eine gute Dauerhaftigkeit und lange Nutzungsdauer bei gleichzeitig hoher Belastbarkeit gelegt werden sollte. Langfristig sollte sich auch die Frage stellen, wie die Zukunft des Verkehrs und der zugehörigen Infrastruktur grundsätzlich aussehen soll.

Literaturverzeichnis

- [1] N. Andrikopoulou, „Straßen der Geschichte, Geschichte der Straßen,“ *Archäologie in Deutschland*, Bd. 6, pp. 8-13, 2012.
- [2] W. Reinhardt, *Geschichte des Öffentlichen Personenverkehrs von den Anfängen bis 2014*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [3] M. Kappel, *Angewandter Straßenbau: Straßenfertiger im Einsatz*, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2020.
- [4] H. Sommer, „Die Entwicklung des Betonstraßenbaus in Österreich,“ *beton*, pp. 418-427, November 2017.
- [5] G. El-Betawy, „Statistik Straße und Verkehr,“ Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Wien, 2023.
- [6] D. Vallée, B. Engel, W. Vogt und H.-G. Schwarz-von Raumer, „Ökologische Folgen,“ in *Stadtverkehrsplanung Band 2*, Heidelberg, Springer-Verlag, 2021, pp. 221-250.
- [7] A. Felderer, M. Balas und S. Völler, „Verkehrsinfrastruktur im Klimawandel,“ Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Wien, 2022.
- [8] U. Brannolte, R. Harder, C. Walther, T. Schäfer und A. Dahl, „Analyse von Umweltwirkungen,“ in *Stadtverkehrsplanung Band 2*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2021, pp. 161-206.
- [9] Österreichischen Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr, „RVS 04.02.13: Verkehrsberuhigung - Auswirkungen auf die Lärm- und Luftschadstoffbelastung,“ Wien, 2007.
- [10] C. Riccabona und T. Bednar, *Baukonstruktionslehre 4*, Wien: MANZ Verlag Schulbuch GmbH, 2013.
- [11] W. Gratt, A. Doppler, W. Bergthaler, L. Leszkovics, D. Niedersüß, L. Paula, P. Kandler und R. Hrdliczka, „Handbuch Umgebungsgeräusch,“ Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft, Wien, 2009.
- [12] M. Schew-Ram, *Stadtbauphysik*, Stuttgart: Springer Vieweg Wiesbaden, 2021.
- [13] A. Seidler, M. Schubert, K. R. Starke, J. Hegewald, S. Riedel-Heller, A. Zülke, U. Becker, W. Schmidt, J. Gerlach, D. Freidemann, B. Schumacher und H. Zeeb, „Einfluss des Lärms auf psychische Erkrankungen des Menschen,“ Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2023.

- [14] Umweltbundesamt, „Indikator: Belastung der Bevölkerung durch Verkehrslärm,“ 27 09 2023. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-belastung-der-bevoelkerung-durch#die-wichtigsten-fakten>. [Zugriff am 17 10 2023].
- [15] Umweltbundesamt, „Umweltbewusstsein und Umweltverhalten,“ 03 08 2023. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/umweltbewusstsein-umweltverhalten#stellenwert-des-umwelt-und-klimaschutzes>. [Zugriff am 17 10 2023].
- [16] T. Beckenbauer, „Reifen-Fahrbahn-Geräusche - Minderungspotentiale der Straßenoberfläche,“ Müller-BBM GmbH, Planegg, 2004.
- [17] Austrian Standards International, „ÖNORM EN ISO 11819-1: Akustik - Messung des Einflusses von Straßenoberflächen auf Verkehrsgeräusche - Teil 1: Statistisches Vorbeifahrtverfahren,“ Wien, 2023.
- [18] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr, „RVS 11.06.64: Rollgeräuschmessungen,“ Wien, 1997.
- [19] Austrian Standards Institute, „ÖNORM EN ISO 11819-2: Akustik - Messung des Einflusses von Straßenoberflächen auf Verkehrsgeräusche - Teil 2: Nahfeldmessverfahren,“ Wien, 2017.
- [20] ISO Internationale Organisation für Normung, „ISO 13472-1, 2022-01-00: Akustik - Messung der Schallabsorptionseigenschaften von Straßenoberflächen vor Ort - Teil 1: Freifeldverfahren,“ 2022.
- [21] U. Peschel, U. Reichart, W. Bartolomaeus, O. Ripke, U. Stöckert und M. Zöllner, „Lärmindernde Fahrbahnbeläge,“ Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2014.
- [22] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, „Empfehlungen für die Planung und Ausführung von lärmtechnisch optimierten Asphaltdeckschichten aus AC D LOA und SMA LA,“ FGSV Verlag, Köln, 2014.
- [23] K. Schellenberg und F. Traber, „Bewährung von Abstreusplitten zur Lärminderung auf Gussasphaltdeckschichten,“ *Straße und Autobahn*, Bd. 9, pp. 707-711, 2023.
- [24] K. Schellenberg, „Lärmarme Oberflächen bei Gussasphalt-Deckschichten auf Brücken,“ Bundesamt für Strassen, Bonn, 2016.
- [25] M. Kappel, *Angewandter Straßenbau*, 3 Hrsg., Hameln: Springer Vieweg, 2020.
- [26] C. Becker und M. Wieland, „Fahrbahnoberflächen - Entwicklungen im Betonstraßenbau,“ *Betonoberflächen*, pp. 54-62, 19 April 2017.
- [27] B. Krieger und N. Sliwa, „Lärmarme Fahrbahnoberflächen: Betonbauweisen – Neuer Standard für die Oberfläche,“ Deutscher Straßen- und Verkehrskongress, Karlsruhe, 2006.

- [28] J. Haberl, J. Litzka, J. Macht und P. Nischer, „Bewertung der Nahfeld-Geräuschemission österreichischer Fahrbahndeckschichten,“ Bundesministerium für Verkehr, Innovation u. Technologie, Bundesstraßenverwaltung, Wien, 2005.
- [29] B. Mazur und A. Kotwa, „Porous Concrete an an Anti-Aquaplaning Building Material,“ *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Bd. 471, Nr. 3, 2019.
- [30] Bundesanstalt für Straßenwesen, „Leiser Straßenverkehr 3,“ Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2017.
- [31] M. Jäcker-Cüppers, *Städtebaulicher Schallschutz*, Springer Vieweg Berlin, Heidelberg, 2017.
- [32] F. Duran und D. Lowke, „Lärmarmes Betonsteinpflaster,“ Centrum Baustoffe und Materialprüfung, Technische Universität München, [Online]. Available: <https://www.mae.ed.tum.de/cbm/forschung/betontechnologie/laermarmes-betonsteinpflaster/>. [Zugriff am 05 07 2024].
- [33] M. Männel, D. Ulonska und S. Steffen, „Akustische Eigenschaften von Betonsteinpflasterstraßen,“ VDI Fachmedien GmbH & Co. KG Unternehmen für Fachinformationen, 01 04 2016. [Online]. Available: <https://www.ingenieur.de/fachmedien/laermbekaempfung/verkehrslaerm/akustische-eigenschaften-von-betonsteinpflasterstrassen/>. [Zugriff am 08 07 2024].
- [34] D. Krutzler, „Neuer Rekord an Tropennächten in Wien,“ STANDARD Verlagsgesellschaft m.b.H., 26 August 2024. [Online]. Available: <https://www.derstandard.at/story/3000000233917/neuer-rekord-an-tropennaechten-in-wien>. [Zugriff am 11 September 2024].
- [35] M. Anderl, A. Bartel, E. Frei, B. Gugele, M. Gössl, S. Mayer, H. Heinfellner, C. Heller und A. Heuber, „Klimaschutzbericht 2022,“ Umweltbundesamt GmbH, Wien, 2022.
- [36] C. Denck, „Aufgehellte Deckschichten: Verbesserung des städtischen Mikroklimas? Teil 1,“ *Straße und Autobahn*, Bd. 9, pp. 712-717, 2023.
- [37] Verband Region Stuttgart, „Klima - Stadt - Wandel: Strategien und Projekte für die Klimaanpassung in der Region Stuttgart: Ergebnisse des Forschungsprojektes KARS- Klimaanpassung in der Region Stuttgart,“ Verband Region Stuttgart, Stuttgart, 2016.
- [38] U.S. Environmental Protection Agency, „Cool Pavements,“ in *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies*, 2012.
- [39] M. Pomerantz, H. Akbari und J. T. Harvey, „Durability and Visibility Benefits of Cooler Reflective Pavements,“ Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, 2000.

- [40] B. Arnd, „Aufgehellte Deckschichten: Verbesserung des städtischen Mikroklimas? Teil 2,“ *Straße und Autobahn*, Bd. 9, pp. 718-722, 2023.
- [41] S. Riffel, „Whitetopping - eine unkonventionelle Sanierungsmethode für Asphaltstraßen?,“ *BetonZement*, pp. 40-44, 2005.
- [42] S. Krispel, G. Maier und P. Weihs, „Urban Heat Islands – Reduktion von innerstädtischen Wärmeinseln durch Whitetopping,“ *Bauphysik*, Nr. 39, pp. 33-40, 2017.
- [43] P. Weihs, S. Hasel, E. Mursch-Radlgruber, C. Gützer, M. Brandmaier, M. Plaikner, S. Krispel und M. Peyerl, „Investigation of the effect of different sealed surfaces,“ Wien, 2015.
- [44] P. Coseo und L. Larsen, „Cooling the Heat Island in Compact Urban Environments: The effectiveness of Chicago’s Green Alley Program,“ *Procedia Engineering*, Nr. 118, pp. 691-710, 2015.
- [45] M. Barthel, N. Vogler, W. Schmidt und H.-C. Kühne, „Outdoor performance tests of self-cooling concrete paving stones for the mitigation,“ *Road Materials and Pavement Design*, pp. 453-463, 11 April 2016.
- [46] Y.-Y. Cheng, S.-L. Lo, C.-C. Ho, J.-Y. Lin und S. L. Yu, „Field Test of Porous Pavement Performance on Runoff and Temperature Control in Taipei City,“ *Water*, Nr. 11, p. 2635, 2019.
- [47] Betonverband Straße, Landschaft, Garten e.V. (SLG), „Merkblatt für versickerungsfähige Pflasterbefestigungen aus Beton,“ Bonn, 2020.
- [48] M. Barthel, W. Schmidt und H.-C. Kühne, „Mitigation of the Urban Heat Island Effect by self-cooling Concrete Pavers,“ *Civil and Environmental Research*, pp. 35-39, Januar 2013.
- [49] Umweltbundesamt, „Flächeninanspruchnahme,“ 2023. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.at/umwelthemen/boden/flaecheninanspruchnahme>. [Zugriff am 12 10 2023].
- [50] H. Taubenböck, M. Wurm, T. Esch und S. Dech, „Versiegelung - schmaler Grat zwischen Belastung und Effizienz,“ in *Globale Urbanisierung*, Heidelberg, Springer Spektrum Berlin, 2015, pp. 121-125.
- [51] WWF Österreich, „WWF-Analyse: Österreichs größte Städte immer stärker versiegelt,“ 18 08 2023. [Online]. Available: <https://www.wwf.at/wwf-analyse-oesterreichs-groesste-staedte-immer-staerker-versiegelt/#:~:text=Betrachtet%20man%20den%20Versiegelungsgrad%2C%20also,Innsbruck%20mit%209%2C6%25..> [Zugriff am 13 10 2023].
- [52] Geschäftsstelle der Österreichischen Raumordnungskonferenz (ÖROK), „ÖREK 2030: Raum für Wandel,“ Wien, 2021.

- [53] IPCC, „Section 3: Long-Term Climate and Development Futures,“ in *Climate Change 2023: Synthesis Report*, Genf, IPCC, 2023, pp. 68-89.
- [54] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), „Merkblatt für Versickerungsfähige Verkehrsflächen,“ FGSV Verlag, Köln, 2013.
- [55] Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, „ÖWAV-Regelblatt 45: Oberflächenentwässerung durch Versickerung in den Untergrund,“ Wien, 2015.
- [56] Austrian Standards Institut, „ÖNORM B 2506-1: Regenwasser-Sicheranlagen für Abläufe von Dachflächen und befestigten Flächen - Teil 1: Anwendung, hydraulische Bemessung, Bau und Betrieb,“ Wien, 2013.
- [57] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft, „eHYD,“ 2024. [Online]. Available: <https://ehyd.gv.at/>. [Zugriff am 19 Juli 2024].
- [58] P. Leistner, A. Kaufmann, M. Koehler, M. Würth, W. K. Hochbauer, S. Dittrich, S. Maier, A. Gordt und M. Jäger, „Bauphysik urbaner Oberflächen,“ *Bauphysik*, pp. 358-368, 11 Oktober 2018.
- [59] Ingenieurbüro Kokai GmbH, „Abflussbeiwert,“ 24 01 2019. [Online]. Available: <https://www.bauformeln.de/wasserbau/hydrologie/abflussbeiwert>. [Zugriff am 11 07 2014].
- [60] B. Pucher, R. Allabashi, M. Lukavsky, A. Pressl und T. Ertl, „Dezentrale Versickerung von Straßenabwässern im urbanen/innerstädtischen Raum,“ *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, Nr. 70, pp. 588-594, 2018.
- [61] W. Ablinger, N. Aschauer, B. Bach, T. Fischer, G. Geiger und F. Grammel, „Richtlinie für hydroaktive Pflaster- und Plattenflächen,“ Forum Qualitätspflaster, Wien, 2021.
- [62] Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr, „RVS 03.08.63: Oberbaubemessung,“ Wien, 2016.
- [63] J. Aschauer, C. Komer, W. Laimer, W. Mühleder und G. Schützeneder, „Leitfaden zur Verbringung von Niederschlagswässern von Dachflächen und befestigten Flächen,“ Amt der Oö. Landesregierung, Linz, 2021.
- [64] B. Nolting, O. Schönberger, K. Harting und P. Gabryl, „Prüfung wasserdurchlässiger Flächenbeläge nach mehrjähriger Betriebsdauer,“ Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (MUNLV), Bochum, 2005.
- [65] K. Kumar, J. Kozak, L. Hundal, A. Cox, H. Zhang und T. Granato, „In-situ infiltration performance of different permeable pavements in a employee used parking lot – A four-year study,“ *Journal of Environmental Management*, Nr. 167, pp. 8-14, 2016.

- [66] D. V. Muttuvelu, S. Wyke und J. Vollertsen, „Are Permeable Pavements a Sustainable Solution? A Qualitative Study of the Usage of Permeable Pavements,“ *Sustainability*, Nr. 14, p. 12432, 2022.
- [67] Stadt Wien, „Schwammstadt-Prinzip macht Bäume für den Klimawandel fit,“ [Online]. Available: <https://www.wien.gv.at/umwelt/parks/schwammstadt.html>. [Zugriff am 11 07 2024].
- [68] Arbeitsgruppe Schwammstadt (GesnbR) , „das Schwammstadt-Prinzip für Bäume,“ [Online]. Available: <https://www.schwammstadt.at/home>. [Zugriff am 06 August 2024].
- [69] Arbeitsgruppe Schwammstadt (GesnbR) , „Quartier am Seebogen, Wien, 3:0 Landschaftsarchitektur, Fertigstellung 1. BA Okt 2022,“ 2022. [Online]. Available: <https://www.schwammstadt.at/projekte/quartier-am-seebogen-wien-30-landschaftsarchitektur>. [Zugriff am 06 August 2024].
- [70] H. Schulz, S. Karrasch, G. Bölke, J. Cyrus, C. Hornberg, Schneider, A. Schneider, C. Witt und B. Hoffmann, „Atmen: Luftschadstoffe und Gesundheit - Teil 1,“ *Pneumologie*, Nr. 5, pp. 288-305, 2019.
- [71] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), „Immissionsschutzgesetz-Luft (IG-L),“ 2021. [Online]. Available: https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/luft/recht/ig_l.html. [Zugriff am 18 Juli 2024].
- [72] Weltgesundheitsorganisation Regionalbüro für Europa, „Globale Luftgüteleitlinien der WHO: Feinstaub (PM_{2,5} und PM₁₀), Ozon, Stickstoffdioxid, Schwefeloxid und Kohlenmonoxid. Zusammenfassung,“ Kopenhagen, 2021.
- [73] H. Schulz, S. Karrasch, G. Bölke, J. Cyrus, C. Hornberg, R. Pickford, A. Schneider, C. Witt und B. Hoffmann, „Atem: Luftschadstoffe und Gesundheit - Teil 2,“ *Pneumologie*, Nr. 73, pp. 347-373, 2019.
- [74] M. Anderl, M. Gager, B. Gugele und K. Huttunen, „Luftschadstoff-Trends in Österreich 1980-2002,“ Umweltbundesamt GmbH, Wien, 2004.
- [75] Umweltbundesamt Gesellschaft mit beschränkter Haftung (UBA-GmbH), „Dashboard Luftschadstoff-Emissionen und Luftqualität in Österreich,“ 2024. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.at/umwelthemen/luft/luftschadstoffe/dashboard>. [Zugriff am 18 Juli 2024].
- [76] M. Bischoff, „Killer-Partikel - gefährlicher als Malaria,“ *MMW - Fortschritte der Medizin*, Nr. 22, p. 156, 2014.
- [77] OECD, „Non-exhaust Particulate Emissions from Road Transport: An Ignored Environmental Policy Challenge,“ OECD Publishing, Paris, 2020.

- [78] F. Reek, „Der meiste Dreck kommt nicht aus dem Auspuff,“ *Süddeutsche Zeitung GmbH*, 6 Mai 2019. [Online]. Available: <https://www.sueddeutsche.de/auto/feinstaub-verkehr-bremsen-reifen-1.4427241>. [Zugriff am 7 August 2024].
- [79] E. Padoan und F. Amato, „Vehicle Non-Exhaust Emissions: Impact on Air Quality,“ in *Non-Exhaust Emissions*, Academic Press, 2018, pp. 21-65.
- [80] J. Panko, M. Kreider und K. Unice, „Review of Tire Wear Emissions: A Review of Tire Emission Measurement Studies: Identification of Gaps and Future Needs,“ in *Non-Exhaust Emissions*, Pittsburgh, Academic Press, 2018, pp. 147-160.
- [81] M. Gustafsson, „Review of Road Wear Emissions: A Review of Road Emission Measurement Studies: Identification of Gaps and Future Needs,“ in *Non-Exhaust Emissions*, Linköping, Academic Press, 2018, pp. 161-181.
- [82] B. R. Denby, K. J. Kupiainen und M. Gustafsson, „Review of Road Dust Emissions,“ in *Non-Exhaust Emissions*, Academic Press, 2018, pp. 183-203.
- [83] R. Harrison, J. Allan, D. Carruthers und M. Heal, „Non-exhaust vehicle emissions of particulate matter and VOC from road traffic: A review,“ *Atmospheric Environment*, Nr. 262, p. 118592, 2021.
- [84] L. Shiyong, H. Wingtat und L. Zhen, „Air pollutant emissions and acoustic performance of hot mix asphalt,“ *Construction and Building Materials*, Nr. 129, pp. 1-10, 2016.
- [85] Umweltbundesamt, „Flüchtige organische Verbindungen,“ 21 November 2016. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/gesundheit/umwelteinfluesse-auf-den-menschen/chemische-stoffe/fluechtige-organische-verbindungen#fluechtige-organische-verbindungen-voc->. [Zugriff am 19 August 2024].
- [86] F. Antwerpes, F. Walter und A. Paul, „Flüchtige organische Verbindung,“ DocCheck Community GmbH, 21 März 2024. [Online]. Available: https://flexikon.doccheck.com/de/Fl%C3%BCchtige_organische_Verbindung. [Zugriff am 19 August 2024].
- [87] P. Khare, J. Machesky, R. Soto, M. He, A. Presto und D. Gentner, „Asphalt-related emissions are a major missing nontraditional source of secondary organic aerosol precursors,“ *Science Advances*, Nr. 6, 2020.
- [88] Deutscher Asphaltverband (DAV) e. V., „Niedrigtemperaturasphalt (NTA),“ Berlin, 2021.
- [89] S. Chen, J. Wang, Q. Li, W. Zhang und C. Yan, „The Investigation of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emissions in Environmentally Friendly Modified Asphalt,“ *Polymers*, Nr. 14, p. 3459, 2022.
- [90] Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH (AGES), „Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK),“ Österreichische Agentur für

Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH (AGES), 10 Oktober 2023. [Online]. Available: <https://www.ages.at/mensch/ernaehrung-lebensmittel/rueckstaende-kontaminanten-von-a-bis-z/polyzyklische-aromatische-kohlenwasserstoffe-pak>. [Zugriff am 28 August 2024].

- [91] M. Ante, „Bitumen und Teer,“ Arbeitsgemeinschaft ökologischer Forschungsinstitute e.V. (AGÖF), August 2021. [Online]. Available: <https://www.agoef.de/schadstoffe/chemische-schadstoffe/bitumen-und-teer.html>. [Zugriff am 28 August 2024].
- [92] A. Müller, Baustoffrecycling, Weimar: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2018.
- [93] M. Kappas, Klimatologie, Bd. 2, Göttingen: Springer Spektrum Berlin, 2024.
- [94] F. Antwerpes, A.-M. Christof, T. Freyer und N. Nicolay, „Kohlendioxid,“ DocCheck Community GmbH, 21 März 2024. [Online]. Available: <https://flexikon.doccheck.com/de/Kohlendioxid>. [Zugriff am 21 August 2024].
- [95] D. Wöhrle, „Kohlenstoffkreislauf und Klimawandel,“ *Chemie in unserer Zeit*, Bd. 2, Nr. 55, pp. 112-124, 2021.
- [96] E. Bellmann und P. Zimmermann, „Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie,“ WWF Deutschland, Berlin, 2019.
- [97] C. Bauer, R. Friedle, F. Papsch, S. Spaun und C. Dankl, „Zementherstellung in Österreich,“ Zement + Beton Handels- und Werbeges.m.b.H., Wien, 2021.
- [98] C. Herget, T. Proske und C.-A. Graubner, „Betone aus Multikompositzementen mit Kalkstein und calciniertem Ton,“ *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 4, Nr. 116, pp. 286-295, 2021.
- [99] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, „Integrierter nationaler Energie- und Klimaplan für Österreich,“ Wien, 2024.
- [100] Wien Energie GmbH, „Carbon Capture Utilization and Storage,“ Wien Energie GmbH, [Online]. Available: <https://positionen.wienenergie.at/wissenshub/einfach-erklart/rund-um-die-energiewende/carbon-capture/>. [Zugriff am 22 August 2024].
- [101] Deutscher Asphaltverband (DAV) e.V., „Asphalt ist ein umweltfreundliches Produkt,“ Deutscher Asphaltverband (DAV) e.V., 2022. [Online]. Available: <https://www.asphalt.de/themen/umwelt/>. [Zugriff am 22 August 2024].
- [102] Bundesanstalt für Straßenwesen, „Temperaturreduzierte Asphaltbauweisen,“ Bundesanstalt für Straßenwesen, [Online]. Available: <https://www.bast.de/DE/Strassenbau/Fachthemen/s3-asphalt.html>. [Zugriff am 22 August 2024].
- [103] Wirtgen Österreich GmbH, „Niedrigtemperaturasphalt,“ Wirtgen Österreich GmbH, [Online]. Available: <https://www.wirtgen-group.com/de->

at/anwendungen/strassenbau/strassenneubau/niedrigtemperaturasphalt/. [Zugriff am 22 August 2024].

- [104] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, „Merkblatt für Temperaturabsenkung von Asphalt,“ FGSV Verlag GmbH, Köln, 2021.
- [105] T. Schinkinger und B. Hofko, „Viacore – Ultra Temperatur abgesenkter Asphalt,“ Österreichische VIALIT-Gesellschaft m.b.H., 2018. [Online]. Available: https://www.vialit.at/wp-content/uploads/sites/8/2018/09/fachartikel_viacore.pdf. [Zugriff am 23 August 2024].
- [106] K. Teschner, R. Teschner und M. Schweizer, „Technischer Kurzbericht: "Grüner Asphalt": ein Meilenstein zum klimaverträglichen Strassenbau,“ ViaTec Basel AG, Basel, 2023.
- [107] Bayerische Ingenieurekammer-Bau, „CO2-negativer Asphalt: Ein Meilenstein zum klimaverträglichen Straßenbau,“ Bayerische Ingenieurekammer-Bau, 10 August 2023. [Online]. Available: https://www.bayika.de/de/aktuelles/meldungen/2023-08-10_CO2-negativer-Asphalt-Ein-Meilenstein-zum-klimavertraeglichen-Strassenbau.php. [Zugriff am 22 August 2024].
- [108] N. Eisenmenger, B. Plank, E. Milota und S. Gierlinger, „Ressourcennutzung in Österreich 2020,“ Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), Wien, 2020.
- [109] C. Neubauer, A. Bernhardt, C. Brandstätter, C. Broneder, U. Kral, J. Olivia, M. Roll, A. Schaffernak, B. Stoifl, M. Tesar, M. Tista, B. Walter und T. Weißenbach, „Die Bestandaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich: Statusbericht 2023 für das Referenzjahr 2021,“ Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Wien, 2023.
- [110] P. Pfleger, „Ungenutzte Schätze aus der Baugrube,“ ORF.at, 17 März 2024. [Online]. Available: <https://orf.at/stories/3351440/>. [Zugriff am 03 September 2024].
- [111] Bundesminister für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, „Recycling-Baustoffverordnung (BGBl. II Nr. 181/2015),“ Bundeskanzleramt der Republik Österreich, 2016. [Online]. Available: <https://www.ris.bka.gv.at/geltendefassung.wxe?abfrage=bundesnormen&gesetzesnummer=20009212&fass>. [Zugriff am 29 August 2024].
- [112] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), „Recycling-Baustoffverordnung,“ Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), [Online]. Available: https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/abfall/recht/vo/recycling.html. [Zugriff am 23 August 2024].

- [113] Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, „Erläuterungen zur Recycling-Baustoffverordnung,“ Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Wien, 2018.
- [114] T. Kasper und W. Stanek, „Richtlinie Recycling-Baustoffe,“ Österreichischer Baustoff-Recycling Verband, Wien, 2017.
- [115] Bundesminister für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, „Deponieverordnung 2008 § 7,“ Bundeskanzleramt der Republik Österreich, 01 Jänner 2024. [Online]. Available: <https://www.ris.bka.gv.at/NormDokument.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20005653&Paragraf=7>. [Zugriff am 03 September 2024].
- [116] Austrian Standards Institute, „ÖNORM EN 13108-8: Asphaltmischgut - Mischgutanforderungen: Teil 8: Ausbaupasphalt,“ Wien, 2016.
- [117] Austrian Standards Institute, „ÖNORM EN 13043,“ Austrian Standards plus GmbH, Wien, 2014.
- [118] Austrian Standards Institute, „ÖNORM B 3130: Gesteinskörnung für Asphalte und Oberflächenbehandlungen für Straßen, Flugplätze und andere Verkehrsflächen,“ Austrian Standards plus GmbH, Wien, 2016.
- [119] Austrian Standards International, „ÖNORM B 3580-1: Asphaltmischgut - Mischgutanforderungen - Asphaltbeton: Teil 1: Empirische Anforderungen“.
- [120] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, „Merkblatt für die Wiederverwendung von Asphalt (M WA),“ FGSV Verlag, Köln, 2013.
- [121] Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr, „RVS 08.97.05 Anforderungen an Asphaltmischgut,“ Wien, 2019.
- [122] Austrian Standards Institute, „ÖNORM EN 12620: Gesteinskörnung für Beton,“ Austrian Standards plus GmbH, Wien, 2014.
- [123] Austrian Standards Institute, „ÖNORM B 3131: Gesteinskörnung für Beton,“ Austrian Standards plus GmbH, Wien, 2016.
- [124] J. Steigenberger, H. Eisner und S. Marchtrenker, „Aktuelles zum Thema Betonstrassen: update 1/11: Recycling von Beton im Strassenbau,“ [Online]. Available: https://www.zement.at/downloads/update1_11.pdf. [Zugriff am 9 September 2024].
- [125] Austrian Standards Institute, „ÖNORM EN 13242: Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische für Ingenieur- und Straßenbau,“ Austrian Standards plus GmbH, Wien, 2014.

- [126] Austrian Standards Institute, „ÖNORM B 3132: Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische für Ingenieur- und Straßenbau,“ Austrian Standards plus GmbH, Wien, 2016.
- [127] Austrian Standards International, „ÖNORM B 3140: Rezyklierte Gesteinskörnung für ungebunden und hydraulisch gebundene Anwendungen sowie für Beton,“ Austrian Standards plus GmbH, Wien, 2020.
- [128] Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr, „RVS 08.17.02: Deckenherstellung,“ Wien, 2011.
- [129] H. Reisinger, A. Bernhardt, B. Karigl, M. Neubauer, P. Thaler und B. Walter, „Aushubmaterialien,“ Umweltbundesamt GmbH, Wien, 2016.
- [130] Austrian Standards International, „ÖNORM B 3141: Herstellung von Recycling-Baustoffen aus Aushubmaterialien - Anforderungen,“ Austrian Standards plus GmbH, Wien, 2024.
- [131] Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, „Verkehr in Zahlen,“ Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Wien, 2011.
- [132] S. AUSTRIA, „Strukturdaten Straße,“ STATISTIK AUSTRIA, 14 Juli 2023. [Online]. Available: <https://www.statistik.at/statistiken/tourismus-und-verkehr/verkehrsunternehmen-infrastruktur/strukturdaten-strasse>. [Zugriff am 4 Jänner 2023].
- [133] Österreichischer Zivilschutzverband, „Starkregen: Extremereignis mit hohem Schadenspotential,“ [Online]. Available: <https://www.zivilschutz.at/thema/starkregen/>. [Zugriff am 08 07 2024].

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1: Air-Pumping-Effekt am rollenden Reifen. Eigene Darstellung nach [16].....	11
Abbildung 3.2: Horneffekt. Eigene Darstellung nach [16].....	12
Abbildung 3.3: Konvexe und konkave Textur. Eigene Darstellung nach [21].....	13
Abbildung 3.4: Durchschnittliche Schallpegelminderung verschiedener Straßenoberflächen verglichen mit Splittmastixasphalt. Eigene Darstellung unter Verwendung von [9], [21], [24], [26], [27], [32]	19
Abbildung 4.1: Reduktion der Oberflächentemperatur verglichen mit herkömmlicher, dichter Bauweise. Eigene Darstellung unter Verwendung von [46].....	24
Abbildung 4.2: Reduktion der Oberflächentemperatur verschiedener Straßenbeläge verglichen mit herkömmlichem Asphalt. Eigene Darstellung unter Verwendung von [40], [42], [46].....	25
Abbildung 5.1: Versiegelungsgrad und Flächenverbrauch pro Einwohner in Österreichs Großstädten. Eigene Darstellung unter Verwendung von [51], [52].....	26
Abbildung 5.2: Abflussbeiwert verschiedener Oberflächen. Eigene Darstellung unter Verwendung von [58], [59]	28
Abbildung 5.3: Veränderung der Infiltrationsrate verschiedener Oberflächen. Eigene Darstellung unter Verwendung von [65]	36
Abbildung 6.1: Durchschnittlicher Beitrag der verschiedenen Feinstaubquellen zur Gesamtbelastung. Eigene Darstellung unter Verwendung von [79]	41
Abbildung 7.1: Verwendung bzw. Verbleib von Bau- und Abbruchabfällen im Jahr 2021. Eigene Darstellung unter Verwendung von [109].....	51
Abbildung 7.2: Verwendung bzw. Verbleib des im Jahr 2021 in Österreich angefallenen Aushubmaterials. Eigene Darstellung unter Verwendung von [109].....	52